

Das elektrische Betriebsverhalten eines PEM-Brennstoffzellensystems

DIPLOMARBEIT



Institut für Elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik
Abteilung Elektrische Anlagen

an der
Technischen Universität Graz

Leiter der Abteilung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert

Begutachter: Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Sakulin
Betreuung: Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Herwig Renner

Vorgelegt von: Christian Kitz

Graz, im Dezember 2002

Danksagung

Dieses Projekt wurde in einer Zusammenarbeit von ESTAG (Energie Steiermark AG) in Kooperation mit seinem strategischen Partner EDF (Electricité de France) und dem Christian-Doppler-Pilot-Laboratorium für Brennstoffzellensysteme mit flüssigen Elektrolyten, Institut für Chemische Technologie anorganischer Stoffe unter der Leitung von Hr. Univ. Prof. Jürgen Besenhard durchgeführt.

Laborleiter Hr. Dr. techn. Viktor Hacker und seinem wissenschaftlichem Team sollen für Ihre unkomplizierte und rasche Integration ins Laborleben als auch für die Unterstützung in allen chemischen, physikalischen, maschinenbaulichen und verfahrenstechnischen Fragestellungen mein Dank ausgesprochen werden.

An der Abteilung für elektrische Anlagen möchte Ich mich recht herzlich für die Möglichkeit einer solch interessanten Themenstellung bei Hr. Ao. Univ. Prof. Dr. techn. Manfred Sakulin, seiner Betreuung sowie der Abwicklung projektbezogener Sachfragen gegenüber den beteiligten Partnern bedanken.

Meinem Betreuer, Hr. Ass. Prof. Dr. techn. Herwig Renner sei mein tiefer Dank ausgesprochen. Ohne seinen hilfsbereiten Einsatz, der schnellen und kompetenten Ratschläge in schwierigen Situationen als auch der Hilfestellungen am Anfang dieses Projektes wäre ein solcher Ablauf nicht möglich gewesen.

Für die Bereitstellung und die Systemintegration in Fragen der Informationstechnologie ein Dankeschön an Hr. Ing. Herbert Gössler.

Hr. Alan Mace (Engineering Field Services Manager) und Hr. Arne LaVen (Project Manager) von der Fa. IdaTech ein Dankeschön für ihre hilfsbereite Art und Weise sowie auch Ihrer Bereitschaft prinzipielle Systemfragen zu erörtern.

Vielen Dank meinen Eltern für die Ermöglichung dieses Studiums als auch für die finanzielle Unterstützung während dieser Zeit.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	4
ABSTRACT.....	4
1. ÜBERBLICK ÜBER BRENNSTOFFZELLENSYSTEME	5
1.1 Einleitung	5
1.2 Funktionsprinzip und Thermodynamik der Brennstoffzellen	5
1.3 Brennstoffreformierung.....	10
1.3.1 Erzeugung eines wasserstoffreichen Gases	10
1.3.2 Prozessgas Aufbereitung	11
1.4 Brennstoffzellentypen	12
1.4.1 Alkalische Brennstoffzelle (AFC).....	14
1.4.2 Polymermembran-Brennstoffzelle (PEFC)	15
1.4.3 Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC).....	16
1.4.4 Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	16
1.4.5 Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle (MCFC).....	17
1.4.6 Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC).....	18
1.5 Brennstoffzellensysteme.....	18
1.5.1 Brennstoffauswahl.....	19
1.5.2 Wirkungsgrade und Emissionen.....	20
1.6 Anwendungspotenzial von Brennstoffzellensystemen.....	21
1.6.1 Virtuelles Kraftwerk	22
1.6.2 Energie Dienstleistung	22
2. POLYMERMEMBRAN-BRENNSTOFFZELLEN-SYSTEME.....	22
2.1 Einleitung	22
2.2 Historisches zur PEM-Technologie.....	23
2.3 Funktionsweise und Aufbau der PEM-Brennstoffzelle	23
2.4 Aufbau und Charakteristika von PEM-Brennstoffzellen-Systemen	25
2.5 Anwendung in mobilen Systemen	27
3. EMISSIONEN.....	27
3.1 Grenzwerte für luftverunreinigende Stoffe.....	28
3.2 Ermittlung der Dosis-Wirkungsbeziehung	28
3.2.1 Kohlenmonoxid CO	29
3.2.2 Kohlendioxid CO ₂	30
3.2.3 Stickstoffoxide.....	30
4. INFORMATIONEN ZUM FC 1200 SYSTEM UND FUEL PROZESSOR.....	31

4.1 Ballard Nexa 1200 Watt Compact Power Supply System.....	31
4.2 Fuel Prozessor (IdaTech)	33
4.2.1 Wasserstoffreiniger	35
4.2.2 Dampfpreformer.....	37
4.2.3 Wirkungsgrad	37
4.2.4 Potential für weitere Anwendungen	38
5. METHANOL-WASSERGEMISCH	39
5.1 Energieinhalt von Methanol-Wassergemisch	39
5.2 Chemische Reaktion.....	41
6. MESSPROGRAMM	41
7. MESSUNGEN AN EINEM PEMFC-SYSTEM	42
7.1 Beschreibung des FC 1200 Systems	42
7.1.1 Fuel Prozessor	42
7.1.2 Fuel Cell	43
7.1.3 DC/DC-Konverter	43
7.1.4 Batterie	43
7.1.5 Wechselrichter.....	44
7.1.6 Abluft	44
7.1.7 Kraftstoffversorgung	44
7.2 Messsystem.....	44
7.2.1 Eigene Messungen.....	44
7.2.2 Testaufbau	45
7.2.3 Systemmessung	46
7.2.4 Verbrauch des Methanol-Wassergemisches	46
7.2.5 Analoge Größen	47
7.2.6 Messprogramm MessungDewetron32.....	47
7.2.7 Temperaturmessung	50
7.2.8 Messung der Blindleistung.....	51
7.2.9 Fehler.....	51
7.2.10 Auswertung	52
7.3 Messergebnisse.....	52
7.3.1 Wirkungsgrad	52
7.3.1.1 Block FPFC	52
7.3.1.2 Block DC/DC-Konverter.....	53
7.3.1.3 Block Wechselrichter	53
7.3.1.4 Wirkungsgrad bei konstanter Last am Ausgang des Wechselrichters.....	54
7.3.1.5 Wirkungsgrad bei dynamischer Last am Ausgang des Wechselrichters	57
7.3.1.6 Übersicht über alle gemessenen Wirkungsgrade.....	59
7.3.2 Temperatur	60
7.3.3 Emissionsmessungen.....	61
7.3.3.1 Allgemeines zur Emissionsmessung	61
7.3.3.2 Emissionswerte in Abhängigkeit der Zeit	61
7.3.3.3 Emissionswerte in Abhängigkeit der Leistung.....	66
7.3.4 Zeitverhalten.....	69
7.3.5 Modell	73
7.3.5.1 Beschreibung des Modells.....	73

7.3.5.2 Verwendung des Modells bei stationären Verhältnissen.....	76
7.3.5.3 Verwendung des Modells bei dynamischen Verhältnissen	76
7.3.5.4 Analyse des Modells für konstante Verhältnisse.....	78
7.3.5.5 Analyse des Modells für dynamische Verhältnisse.....	87
7.3.5.6 Anmerkungen zum Brennstoffzellensystem FCS 1200.....	92
7.3.6 Verbraucher mit ohmsch-induktivem bzw. ohmsch-kapazitivem Verhalten	92
7.3.6.1 Ohmsch-kapazitive Belastung.....	93
7.3.6.2 Ohmsch-induktive Belastung	93
7.3.7 Synchroner Netzbetrieb.....	94
7.4 Arbeitsplatz im Christian-Doppler-Pilot-Laboratorium für Brennstoffzellensysteme mit flüssigen Elektrolyten.....	96
8. BETRIEBSERFAHRUNGEN	108
8.1 Erzielte Leistungen.....	108
8.2 Bemerkungen zu den im Messprogramm angeführten Punkten	109
9. ZUSAMMENFASSUNG	109
10. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	112
11. LITERATURVERZEICHNIS.....	113
12. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	118
13. TABELLENVERZEICHNIS	121
14. WWW-VERZEICHNIS.....	122
15. ANHANG.....	123
15.1 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik	123
15.2 Verwendete Geräte.....	124
15.3 Daten.....	124

Kurzfassung

Das elektrische Betriebsverhalten eines PEM-Brennstoffzellensystems für Kleinanwendungen (1 kW) zum jetzigen Zeitpunkt untersuchen zu dürfen darf als noch sehr seltene Möglichkeit bewertet werden. Die Partner, die diese Möglichkeit für die TU-Graz eröffneten sind die Energie Steiermark AG (ESTAG) und ihr strategischer Partner Electricité de France (EDF). Der Abteilung für elektrische Anlagen wurde am 1. März 2002 von der ESTAG ein 1 kW System für Versuchszwecke für einen Zeitraum von einem Jahr überlassen, wobei in den ersten sechs Monaten aufgrund des geltenden Garantieanspruches seitens der Hersteller ein intensiver Betrieb durchgeführt werden sollte. Als Standort wurde das Christian-Doppler-Pilot-Laboratorium für Brennstoffzellensysteme mit flüssigen Elektrolyten in Graz bestimmt da die vorhandene Infrastruktur dort am geeignetsten erschien und die angestrebte interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen technischer Chemie, technischer Physik, Maschinenbau und Verfahrenstechnik mit der kurzzeitigen Eingliederung der Elektrotechnik erweitert werden konnte. Das System wurde von der Fa. IdaTech (USA) an die EDF verkauft. IdaTech ist für die Systemintegration als auch für die Herstellung des Methanolreformers zuständig. Der Stack wurde vom Marktführer Ballard hinzugekauft. Folgende Punkte sollen nach Maßgabe der vorhandenen Möglichkeiten näher untersucht werden: Emissionsvermögen, Wirkungsgrade, verschiedene Belastungszustände (stationär, dynamisch) und eine elektrische Nachbildung des Systems in Form eines Modells. Ein besonderer Augenmerk sollte auf die Alltagstauglichkeit des Systems gelegt werden.

„Das Elektrische Betriebsverhalten eines PEM-Brennstoffzellensystems“: Emissionsvermögen, Wirkungsgrade, verschiedene Belastungszustände, Modell, Alltagstauglichkeit.

Abstract

To analyse the electrical behaviour of a PEM Fuel Cell System for small consumer load (1 kW) to this point of time is still very uncommonly. The associate partners who make this possible for the Technical University of Graz are the power styria public company (ESTAG) and the Electric Power of France (Electricité de France, EDF). On the 1st March of 2002 ESTAG cedes the department of electrical power systems a 1 kW System for physical experiments for one year. During the period of guarantee in the first six months till the end of the month of august all physical experiments should be done. The best place for the system is the Christian-Doppler-Pilot laboratory for Fuel Cell Systems with liquid Electrolytes in Graz because of the target interdisciplinary cooperation between chemical engineering, physical engineering, mechanical engineering and process engineering with the short-time integration of electrical engineering. The FC System was sold from IdaTech (USA) to EDF. IdaTech will be bound by all obligations for the system integration and also for the manufacture of the methanol fuel processor. The stack was bought from Ballard. Following point have to pay attention below mean possibilities: emissivity, efficiencies, various load states (static, dynamic) and an electric model of the system. An especially attention should be taken to the requisitions of every day life to the system.

“The electrical behaviour of a PEM Fuel Cell System”: emissivity, efficiencies, various load states, model, every day life.

1. Überblick über Brennstoffzellensysteme

1.1 Einleitung

[3], [5], [30], [31], [32]

Der englische Physiker Sir William Grove (1811 bis 1869) entdeckte im Jahre 1839 das Prinzip der Brennstoffzelle. Die damit erzielbaren Leistungen waren noch recht begrenzt. Nur einige wenige Technologieentwicklungen über längere Zeit, mit Ausnahme der Kommerzialisierung großer Anwendungen, beinhalten eine so wichtige Erfindung. Die großen Erfindungen des 19. Jahrhunderts waren im Bereich der Energieumformungsgeräte auszumachen wie der Elektromotor, der Gleichstromgenerator, die Dampfmaschine, die Verbrennungskraftmaschine und der Hall-Héroult Schmelz Salz Elektrolyseprozess für die Aluminiumproduktion. Genauer über die Geschichte ist in [30] und in [31] nachzulesen.

Grove hatte zuerst die thermische Dissoziation von Molekülen erreicht, indem Wasserdampf, mit einem Platindraht erhitzt, in Wasserstoff und Sauerstoff zerfiel. Anschließend konnte nachgewiesen werden, dass diese Reaktion auch umkehrbar ist, wobei die chemische Energie über eine kalte Verbrennung direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts entdeckte Werner von Siemens (1816 bis 1892) dann das elektrodynamische Prinzip und entwickelte darauf basierend entsprechende Generatoren. Aus dem Gebiet der Elektrochemie konnten nur die Batterien technische Bedeutung erlangen. Für die Anwendung im Weltall (Raumfahrzeuge) und für Wasserfahrzeuge (Unterseebote) wurde das Prinzip der Brennstoffzelle jedoch wiederentdeckt.

Brennstoffzellen erzeugen wie Batterien elektrische Energie auf chemischem Wege. Jedoch lassen sich bei Brennstoffzellen Reaktanden und Reaktionsprodukte kontinuierlich zu- und abführen.

Brennstoffzellen haben folgende prinzipielle Eigenschaften:

- Hoher Wirkungsgrad,
- Schadstoffarmut,
- Modularer Aufbau und
- Sehr gute Eignung zur Kraft-Wärme-Kopplung.

1.2 Funktionsprinzip und Thermodynamik der Brennstoffzellen

[2], [3], [4], [5], [30], [31], [32]

Bei der konventionellen Stromerzeugung über Verbrennungsprozesse wird die chemische Energie des Brennstoffes (z.B. Kohle oder Erdgas) zunächst in innere Energie des Verbrennungsgases umgewandelt. In einer typischen Wärmekraftanlage wird ein Teil dieser inneren Energie in Wärme auf ein Arbeitsmedium, in der Regel Wasser oder Wasserdampf (z.B. 530°C und 180 bar), übertragen, welches dann einen Kreisprozess durchläuft. Diese Nutzarbeit wird anschließend im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Der dabei maximal erreichbare Wirkungsgrad, der sogenannte Carnot-Wirkungsgrad η_c ist von der oberen Systemtemperatur T_o und der Umgebungstemperatur T_u abhängig:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_u}{T_o}. \quad (1)$$

In Brennstoffzellen dagegen wird diese Begrenzung der Energieumwandlung umgangen, da der Weg nicht über den Umweg der Wärmeenergie sondern direkt von chemischer zu elektrischer Energie führt. Jede Brennstoffzelle enthält zwei Elektroden, die **Anode**, an der der Brennstoff zugeführt wird, und die **Kathode**, an der das Oxidans¹, reiner Sauerstoff oder Luft, zugeführt wird. Die räumliche Trennung der Reaktionspartner wird durch einen **Elektrolyten** realisiert. Auf diese Weise wird der Reaktionsablauf so kontrolliert, dass der bei jeder chemischen Reaktion stattfindende Elektronenaustausch nicht lokal, sondern über einen äußeren Stromkreis abläuft. Dies ist in Abbildung 1 an Hand einer Membran-Brennstoffzelle beispielhaft dargestellt. In diesem Beispiel dient Wasserstoff als Brenngas, Sauerstoff als Oxidans und eine Polymermembran als Elektrolyt. Zwischen den beiden Elektroden besteht eine Potentialdifferenz, die im reversiblen Grenzfall als reversible Klemmenspannung bezeichnet wird. An der Anode wird das Brenngas oxidiert, dabei entstehen Protonen H^+ , die durch den Elektrolyten zur Kathode wandern, während die Elektronen im äußeren Stromkreis auf Grund der Potentialdifferenz von der Anode zur Kathode fließen. An der Kathode wird der Sauerstoff unter Aufnahme von Elektronen reduziert und das Reaktionsprodukt Wasser entsteht. Ohne die Ionenleitung im Elektrolyten, ohne die Elektronenleitung im äußeren Stromkreis oder wenn sich das thermodynamische Gleichgewicht eingestellt hat, kommt die Reaktion zum Erliegen.

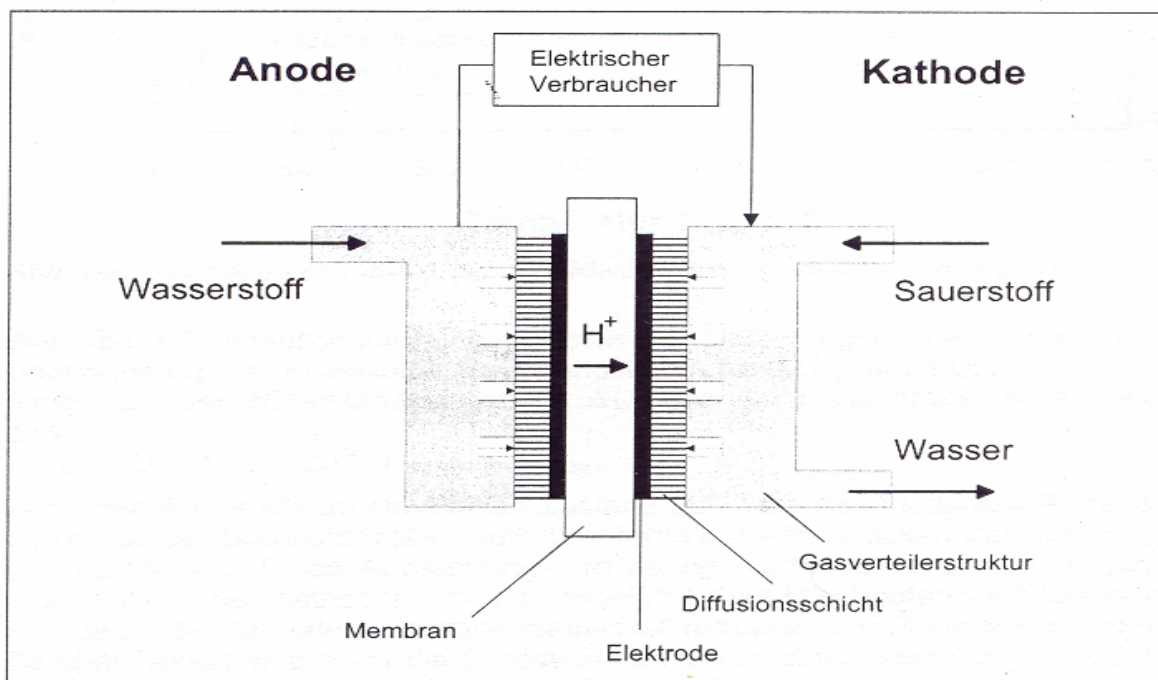
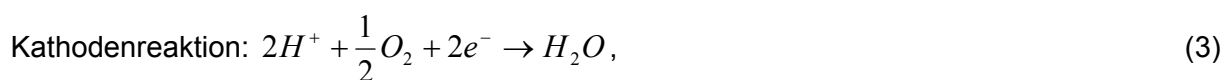


Abbildung 1 Funktionsprinzip von Brennstoffzellen (Membran-Brennstoffzelle PEFC, Quelle:[3]).



¹ Fördert die Oxidation eines anderen Mittels und wird dabei selbst reduziert.

Mit Hilfe der Thermodynamik lässt sich die maximal erreichbare Spannung einer Brennstoffzelle sowie der theoretisch maximal erreichbare elektrische Wirkungsgrad bestimmen. Die thermoneutrale oder auch enthalpische Zellspannung U_{th}

$$U_{th} = -\frac{\Delta H_o^0}{n \cdot F} = 1.48V \quad (5)$$

kann für die Bildung von flüssigem Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff im Standardzustand bei $T_0=298.15$ K und $p_0=1.013$ bar mit Hilfe des oberen Heizwertes $\Delta H_o^0 = -285.8$ kJ/mol, der Anzahl n der an der Reaktion beteiligten Elektronen (hier: 2) und der Faraday-Konstanten F , die sich aus dem Produkt der elektrischen Elementarladung

$e = 1.6022 \cdot 10^{-19}$ C und $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ 1/mol, der Avogadro-Konstanten, zu 96487 C/mol ergibt, berechnet werden. In vielen Fällen, insbesondere bei den Mittel- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen, bei denen das Produkt Wasser in der Gasphase anfällt, wird die enthalpische Zellspannung auch auf den unteren Heizwert des Wasserstoffs $\Delta H_u^0 = -241.8$ kJ/mol bezogen, womit sich ein Wert von 1.25 V ergibt. Da in der Energietechnik sehr häufig mit dem bekannten unteren Heizwert von Brennstoffen gearbeitet wird, ermöglicht diese Vorgehensweise eine bessere Vergleichbarkeit mit konventionellen Prozessen.

Die freie Reaktionsenthalpie ΔG der Gesamtreaktion entspricht der elektrischen Arbeit, die maximal von der Brennstoffzelle abgegeben wird, wenn die Reaktanden und das Produktwasser bei derselben Temperatur und bei demselben Druck zu- bzw. abgeführt werden. Im Standardzustand entspricht diese reversible Reaktionsarbeit $\Delta G_o^0 = -237.3$ kJ/mol für flüssiges Wasser bzw. $\Delta G_u^0 = -228.6$ kJ/mol für gasförmiges Produktwasser. Damit kann nun die reversible Zellspannung U_{rev}^0 im Standardzustand mit Hilfe der Gleichung 6

$$U_{rev}^0 = -\frac{\Delta G_o^0}{n \cdot F} = 1.23V \quad (6)$$

berechnet werden. Der ideale Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle folgt aus der freien Reaktionsenthalpie ΔG_o^0 , d.h. der maximal gewinnbaren Arbeit, bezogen auf die Reaktionsenthalpie H_o^0 :

$$\eta_{Max} = \frac{\Delta G_o^0}{\Delta H_u^0} = -\frac{U_{rev}^0 \cdot n \cdot F}{\Delta H_o^0} \quad (7)$$

Unter Standardbedingungen beträgt dieser ideale Wirkungsgrad $\eta_{Max} = 83.3$ %. Liegt das Produktwasser in der Gasphase ($\Delta G_u^0, \Delta H_u^0$) vor, beträgt dieser Wert 94.5 %. Der Vergleich von Carnot- und idealem Wirkungsgrad η_{Max} ist in Abhängigkeit von der Temperatur in Abbildung 2 dargestellt, wobei hier aus den o.a. Gründen mit gasförmigem Wasser gerechnet wurde. Allerdings ist die sich real einstellende Klemmenspannung auf Grund der im Inneren der Brennstoffzelle ablaufenden nicht idealen Prozesse selbst im stromlosen Zustand niedriger als die bei dem jeweiligen Druck und Temperatur geltende reversible Zellspannung U_{rev} . Bei Stromfluss setzt sich der Spannungsverlust dann aus der Durchtritts-, Reaktions- und Transportüberspannung an der Kathoden- und an der Anodenseite sowie aus der Widerstandsüberspannung an der Membran/Elektrodeneinheit zusammen. Im Allgemeinen können allerdings die Überspannungen und Verluste an der Anode verglichen mit denen der Kathode vernachlässigt werden.

Der Spannungswirkungsgrad η_U beschreibt das Verhältnis der Zellspannung am Betriebspunkt U zur jeweiligen reversiblen Zellspannung U_{rev} :

$$\eta_U = \frac{U}{U_{rev}}. \quad (8)$$

Wie Abbildung 3 veranschaulicht, ergibt sich der Spannungsverlust ΔU aus der Überlagerung der reversiblen Spannungsdifferenz ΔU_{rev} , der Durchtrittsspannung ΔU_D , der Widerstandsspannung ΔU_R und der Konzentrationsspannung ΔU_{Diff} :

$$\Delta U = \Delta U_{rev} + \Delta U_D + \Delta U_R + \Delta U_{Diff}. \quad (9)$$

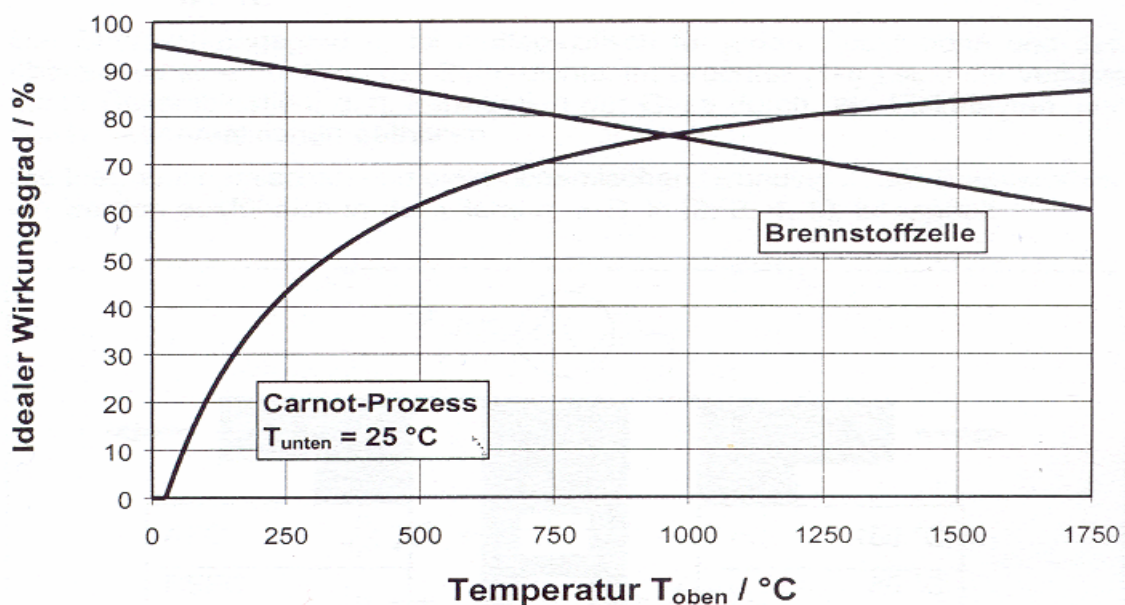


Abbildung 2 Vergleich des Carnot- mit dem idealen Brennstoffzellen-Wirkungsgrad (Quelle: [3]).

Zunächst fällt bereits im stromlosen Zustand auf, dass das messbare Ruhepotenzial U_R der Brennstoffzelle deutlich unterhalb der reversiblen Zellspannung von 1.23 V liegt. Diese Abweichung wird häufig auf die Bildung eines Mischpotenzials an der Kathodenseite zurückgeführt. Das Mischpotenzial bildet sich aus, da an der Kathode gleichzeitig Sauerstoff reduziert und Platin oxidiert wird. Darüber hinaus wird auch die Oxidation von Verunreinigungen für die Ausbildung des Mischpotenzials verantwortlich gemacht.

Bei einer zunächst leichten Belastung der Brennstoffzelle treten bei sehr geringen Stromdichten weitere Spannungsverluste ΔU_D auf, die aufgrund des Durchtritts der Elektronen durch die Phasengrenzfläche zwischen Elektrolyt und Elektrode verursacht werden. Steigert man die Stromstärke weiter, wird der Verlauf der Kennlinie zunehmend durch ohmsche Verluste ΔU_R bestimmt, weshalb in diesem Bereich die Korrelation zwischen Spannung und Strom entsprechend dem ohmschen Gesetz nahezu linear ist.

Bei hohen Strömen tritt dann das Abknicken der Kennlinie immer dann auf, wenn die Nachführung der Edukte² mit kleinerer Geschwindigkeit als die elektrochemische Reaktion erfolgt. Über der Elektrode stellt sich dadurch eine geringere Konzentration ein, was sich als Span-

² Ausgangsstoffe

ungsverlust ΔU_{Diff} auswirkt. Der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} einer Brennstoffzelle bzw. eines Brennstoffzellenstacks kann allgemein für einen bestimmten Betriebspunkt mit einer Temperatur T und Druck p über die Gleichung 10

$$\eta_{ges} = \eta_{max} \cdot \eta_u = -\frac{U \cdot n \cdot F}{\Delta H(T, p)} \quad (10)$$

berechnet werden. Dieser Gesamtwirkungsgrad η_{ges} für eine Brennstoffzelle darf allerdings nicht mit dem Wirkungsgrad eines Gesamtsystems verwechselt werden, bei dem üblicherweise der produzierte Strom auf den oberen bzw. unteren Heizwert des eingesetzten Brennstoffs bezogen wird. Der Systemwirkungsgrad ist im Allgemeinen deutlich niedriger als η_{ges} für den Brennstoffzellenstack, da hier auch die Aufwendungen für die weiteren Systemkomponenten, wie z.B. Gasprozesstechnik und Luftversorgung sowie auch die Brennstoffausnutzung zu berücksichtigen sind.

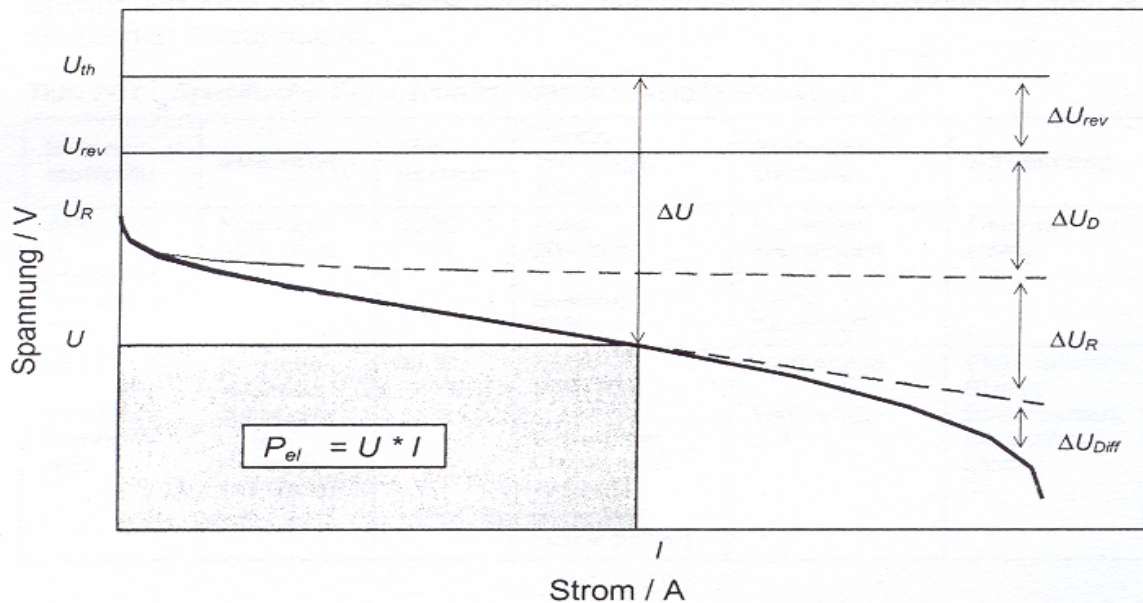


Abbildung 3 Darstellung einer Strom/Spannungskennlinie (Schema, Quelle: [3]).

Der Verlauf der in Abbildung 3 dargestellten Strom/Spannungskurven hängt von der Betriebsweise der Brennstoffzelle ab und wird z.B. durch die Betriebstemperatur, den Druck, dem Brennstoffausnutzungsgrad an der Anodenseite und dem Sauerstoffüberschuss (Luftzahl) auf der Kathodenseite beeinflusst. Ebenso geht der sogenannte Faradaysche oder Stromwirkungsgrad $\eta_{I,i}$ in den Gesamtwirkungsgrad eines Brennstoffzellenstacks ein. Der Stromwirkungsgrad stellt den Bruchteil des Stoffmengenstroms N_i des Reaktanden i dar, der durch elektrochemische Reaktion zum Stromfluss I beiträgt, und ist wie folgt definiert:

$$\eta_{I,i} = \frac{I}{n \cdot F \cdot N_i} \quad (11)$$

Der Stromwirkungsgrad $\eta_{I,i}$ ist stoffspezifisch für jeden Reaktanden und darüber hinaus eine Funktion der Stromdichte. Im Bruchteil $(1 - \eta_{I,i})$ sind die Verluste durch Rekombination³, d.h. Permeation⁴ der Gase durch den Elektrolyten und durch Nebenreaktionen enthalten. Die thermodynamischen und elektrochemischen Grundlagen der Brennstoffzelle werden ausführlich in der Literatur [2], [3] und [4] behandelt.

1.3 Brennstoffreformierung

[5], [6]

Brennstoffzellensysteme müssen in der Lage sein, in der Praxis übliche Brennstoffe („logistische Energieträger“) zu verarbeiten. Für stationäre Anlagen kommen aus diesem Grunde in erster Linie fossile Energieträger zum Einsatz. In den letzten Jahren sind Tendenzen erkennbar, welche Wasserstoff aus den verschiedensten Formen von erneuerbaren und sonstigen Energieträgern extrahieren bzw. konvertieren.

An der TU-Graz wurde ein Systemkonzept zur effizienten Wasserstoffherstellung entwickelt, dem sogenannten Reformer Sponge Iron Cycle (RESC). Das neue Systemkonzept RESC zur Erzeugung von Wasserstoff basiert auf der Kombination eines Reformers für Kohlenwasserstoffe und des Eisenschwammprozesses und ermöglicht sowohl den Einsatz von Kohlenwasserstoffen als auch von Synthesegasen als Brennstoff. Dieses System wird als Zwischenschritt verstanden zwischen den heutigen fossilen Energieträgern und den zukünftigen Energieträgern, die auf erneuerbaren Energien aufbauen.

Da in der Brennstoffzelle Wasserstoff und Sauerstoff umgesetzt werden, muss der verwendete Brennstoff so aufbereitet werden, dass das der Anode zugeführte Gas einen möglichst hohen Anteil an Wasserstoff besitzt. Kathodenseitig wird in den meisten Fällen Luftsauerstoff eingesetzt, der über einen Staubfilter gereinigt wird.

1.3.1 Erzeugung eines wasserstoffreichen Gases

Für die großtechnische Erzeugung von Wasserstoff und für den Einsatz von Erdgas als Energieträger für stationäre Brennstoffzellensysteme ist die **Dampfreformierung** am weitesten verbreitet. Durch Zufuhr von Wasserdampf entsteht über eine katalytische Reaktion wasserstoffreiches Synthesegas. Diese Reaktion ist endotherm, d.h. im Falle von Erdgas muss thermische Energie⁵ zugeführt werden, um das Reaktionsgleichgewicht auf die Produktseite zu verschieben.



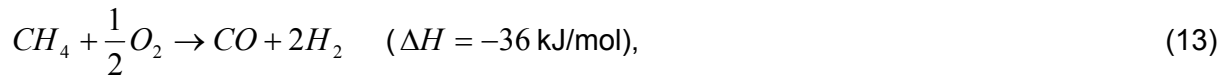
Vorteile sind bei der Dampfreformierung in den hohen Wirkungsgraden, vergleichsweise niedrigen Betriebstemperaturen und – aufgrund der endothermen Prozessführung – in der guten Steuerbarkeit des Prozesses zu sehen. Die Wirkungsgrade realisierter Anlagen liegen für Erdgas bei 70 bis 85 % (theoretisch maximal 94 %).

Die Verfahren der **partiellen Oxidation** setzen Kohlenwasserstoffe unter Zumengung unterstoichiometrischen Sauerstoff-/Luftgemische bei Temperaturen von über 1300 °C und Drücken bis zu 90 bar um.

³Rekombination: (chem.) (Wieder) Vereinigung entgegengesetzt geladener Atome oder Molekülgruppen bzw. Anlagerung von Elektronen an positiven Ionen zu neutralen Gebilden.

⁴Durchlässigkeit für Flüssigkeiten.

⁵Das Temperaturniveau liegt bei 700 bis 800 °C.

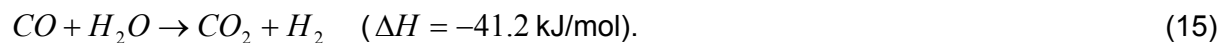


Da die partielle Oxidation exotherm abläuft – somit auch keine externen Wärmequellen erforderlich sind – sind die Start- und Lastwechselzeiten kürzer als bei der Dampfreformierung. Zudem stellt sie – im Gegensatz zur Dampfreformierung – keine besonderen Anforderungen an die Qualität der eingesetzten Energieträger.

Die **autotherme Reformierung** stellt eine Kombination von Dampfreformierung und partieller Oxidation dar. Der Vorteil der autothermen Reformierung liegt ebenfalls im Wegfall der externen Wärmequellen.

1.3.2 Prozessgas Aufbereitung

Sowohl bei der Dampfreformierung als auch bei der partiellen Oxidation von kohlenstoffstämmigen Energieträgern entstehen neben Wasserstoff H_2 auch erhebliche Mengen Kohlenmonoxid CO. Darum wird eine **CO-Konvertierung** durchgeführt, bei der CO mit H_2O unter Erzeugung von H_2 in CO_2 umgesetzt wird.



Dazu wird dem Reformier ein **CO-Shift-Reaktor** nachgeschaltet. Die Konvertierungsreaktion bzw. Shift-Reaktion ist exotherm, die Betriebstemperaturen von Dampfreformern nachgeschalteten CO-Konvertern liegen bei Hochtemperatur-Shift-Reaktoren bei 350 bis 400 °C und bei Niedertemperatur-Shift-Reaktoren bei 190 bis 260 °C. Einer Erdgasreformierung wird typischerweise eine zweistufige CO-Konvertierung mit einer Hoch- und einer Niedertemperaturstufe nachgeschaltet. Dadurch können die CO-Konzentrationen auf 0.5 bis 1.0 % abgesenkt werden.

Das am häufigsten eingesetzte industrielle Verfahren zur Wasserstoffreinigung ist die **Druckwechseladsorption (DWA)**. Für die Gewährleistung eines kontinuierlichen Betriebs ist bei der DWA die Verwendung mehrerer Adsorber erforderlich.

Dadurch können die vier Arbeitszyklen:

1. Einleitung der wasserstoffreichen Gasmische,
2. Druckaufbau,
3. Adsorption des Wasserstoffs an das Adsorptionsmittel (Beladung) und
4. Entspannung

zeitlich versetzt ablaufen.

Ein weiteres Verfahren ist die selektive **CO-Methanisierung**.



Als Katalysatoren werden die folgenden Materialien eingesetzt: Ru, Ni, Co, Fe und Mo. Störende Nebenreaktionen wirken sich negativ auf die Selektivität der Katalysatoren aus. Um beispielsweise einen CO-Gehalt von <100 ppm zu erreichen, muss der CO_2 -Gehalt auf unter 0.5 % reduziert werden. Der dafür notwendige apparative Aufwand lässt den Einsatz für dezentrale stationäre und Kleinanwendungen als wenig sinnvoll erscheinen.

Membranverfahren haben das Ziel, eine Komponente aus einem Gasgemisch durch selektive Permeation bzw. Migration⁶ anzureichern. Für Wasserstoffgemische eignen sich beispielsweise Metallmembranen auf der Basis von Pd/Ag-Legierungen. Wasserdampf kann hierbei allerdings den H₂-Volumenstrom durch die Membran reduzieren. In geringerem Ausmaß existieren auch Durchlässigkeiten für CO und CO₂. Durch die erforderlichen Schichtdicken und wegen der hohen spezifischen Kosten von Pd ergeben sich hohe Investitionen für dieses Verfahren.

Bei der selektiven **CO-Oxidation**



wird unter Verwendung von Edelmetall-Katalysatoren CO durch Zugabe von O₂ oder Luft zu CO₂ oxidiert. Dabei darf nur soviel O₂ zugeführt werden, dass für die Umsetzung des CO benötigt wird. Ansonsten kommt es auch zu einer Oxidation des H₂ zu H₂O und zu einem Wirkungsgradverlust. Eine hohe CO-Selektivität des Katalysators ist hierfür wünschenswert. Von Vorteil sind die niedrigen Betriebsdrücke der selektiven Oxidation (<5 bar) im Vergleich zu Druckwechseladsorptionsanlagen (20 bar) und zu Membranverfahren mit Pd/Ag-Membranen (10 bar). Niedrige Druckniveaus vereinfachen die Betriebsbedingungen und sind positiv hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen insbesondere von dezentralen Energieanlagen.

1.4 Brennstoffzellentypen

[3], [6]

Es gibt verschiedene Brennstoffzellentypen die in der Regel nach der Art des verwendeten Elektrolyten klassifiziert werden. In Abbildung 4 ist schematisch das Funktionsprinzip der unterschiedlichen Systeme dargestellt.

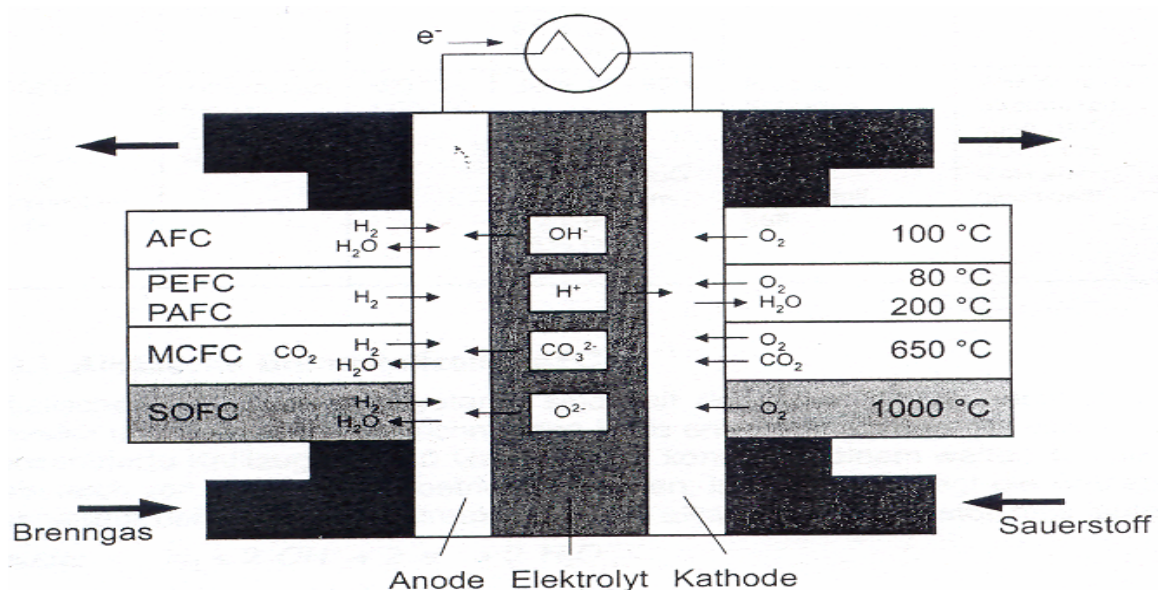


Abbildung 4 Prinzipdarstellung der verschiedenen Brennstoffzellentypen (Quelle: [3]).

⁶ Wanderung von flüssigen oder gasförmigen Stoffen in einem porösen Material (z.B. Weichmacher in Kunststoffen oder Erdöl in Gestein).

Tabelle 1 und Tabelle 2 geben einen Überblick über die spezifischen Eigenschaften der Brennstoffzellentypen.

Zur Bezeichnung werden üblicherweise die englischen Abkürzungen verwendet:

- AFC alkaline fuel cell (Alkalische Brennstoffzelle),
- PEFC proton exchange membrane fuel cell (Membran-Brennstoffzelle),
- PAFC phosphoric acid fuel cell (Phosphorsäure-Brennstoffzelle),
- MCFC molten carbonate fuel cell (Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle),
- SOFC solid oxide fuel cell (Oxidkeramische Brennstoffzelle)

Weitere gebräuchliche Abkürzungen sind SPFC, solid polymer fuel cell; PEMFC, polymer electrolyte membrane fuel cell; IEMFC, ion exchange membrane fuel cell.

Die elektrochemischen Prozesse sind in der Abbildung 4 nach der Betriebstemperatur geordnet. Im Niedertemperaturbereich von 60 bis ca. 130 °C ist die alkalische Brennstoffzelle (AFC) und die Membran-Brennstoffzelle (PEFC) angesiedelt. Im mittleren Temperaturbereich zwischen 160 und 220 °C wird die phosphorsaure Brennstoffzelle betrieben, während die Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle und die oxidkeramische Brennstoffzelle zu den Hochtemperaturzellen gezählt werden. Je nach System wandern Hydroxidionen, Protonen, Carbonationen oder Sauerstoffionen durch den Elektrolyten. Die Materialien für Kathode, Anode und Zellrahmen sind dabei jeweils an die chemischen und elektrochemischen Bedingungen anzupassen.

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Temperatur	Elektr. Wirkungsgrad	Brenngas, Oxidans	Anwendung
AFC Alkalische Brennstoffzelle	Kalilauge 30 % KOH	80 °C	Zelle: 60–70 % System: 62 %	Nur reinst Wasserstoff Reinst Sauerstoff	Raumfahrt, – Militär
PEFC Membran-Brennstoffzelle	Protonenleitende Membran (z. B. Nafion R 117, Dow)	80 °C	Zelle: 50–68 % System bei Erdgasbetr.: 43–50 % (Reformer, Luftverdichter)	Wasserstoff Sauerstoff, Luft	Elektroantriebe, BHKW, Batterieersatz, Raumfahrt, Militär

Tabelle 1 Brennstoffzellentypen und deren spezifische Eigenschaften (Teil 1, Quelle: [3]).

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Temperatur	Elektr. Wirkungsgrad	Brenngas, Oxidans	Anwendung
DMFC Direkt-Methanol-Brennstoffzelle	Protonenleitende Membran (z. B. Nafion, Dow)	80 °C–130 °C	Zelle: 20–30 %	MeOH Sauerstoff, Luft	Elektroantriebe
PAFC Phosphorsäure-Brennstoffzelle	konzentr. Phosphorsäure (H ₃ PO ₄)	200 °C	Zelle: 55 % System bei Erdgasbetr.: 40 %	Wasserstoff Sauerstoff, Luft	BHKW, Stromerzeugung
MCFC Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle	Alkali-karbonatschmelzen (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	650 °C	Zelle: 65 % System bei Erdgasbetr.: 55–60 % BuD (reine Stromerz.): 60–65 % (int. Reform.)	Erdgas, Kohlegas, Biogas, Wasserstoff Sauerstoff, Luft	BHKW, reine Stromerzeugung (BuD: MCFC mit Dampfturbine gekoppelt)
SOFC Oxidkeramische Brennstoffzelle	Yttriumstabilisiertes Zirkonoxid (ZrO ₂ /YO ₃)	800 °C–1.000 °C	Zelle: 60–65 % System bei Erdgasbetr.: 55–60 % BuG (reine Stromerz.): 60–65 % (int. Reform.)	Erdgas, Kohlegas, Biogas, Wasserstoff Sauerstoff, Luft	BHKW, reine Stromerzeugung (BuG: SOFC mit Gasturbine gekoppelt)

Tabelle 2 Brennstoffzellentypen und deren spezifische Eigenschaften (Teil 2, Quelle: [3]).

1.4.1 Alkalische Brennstoffzelle (AFC)

Alkalische Brennstoffzellensysteme sind seit den 50er Jahren besonders in Amerika und Europa bis zur technischen Reife entwickelt worden. Sie verwenden konzentrierte Kalilauge (3-50 Gewichtsprozent) und können in einem weiten Temperaturbereich von 20 bis 90 °C betrieben werden. In der Regel liegt die Betriebstemperatur bei 60 °C. Die Teilreaktionen der alkalischen Brennstoffzelle lauten:



Die alkalische Brennstoffzelle erzielt die höchsten Wirkungsgrade, da die Kinetik der Sauerstoffreduktion in alkalischen Elektrolyten schneller als in sauren Medien abläuft. Für ihren Betrieb sind allerdings reiner Wasserstoff und Sauerstoff erforderlich, denn der alkalische Elektrolyt reagiert mit dem in der Luft enthaltenen Kohlendioxid und Kaliumkarbonat, das die Poren der porösen Gasdiffusionselektroden bereits nach kurzer Zeit blockiert. Wichtige Systemkomponenten der alkalischen Zellen stellen die Elektrolytumwälzung und die Reaktionswasserausschleusung dar.

Auf Grund der CO₂-Unverträglichkeit beschränkt sich der Einsatz von AFC auf Anwendungen, bei denen hochreine Gase vorhanden sind. So wurden alkalische Brennstoffzellen in

der Vergangenheit erfolgreich im Apollo Raumfahrtprogramm der NASA eingesetzt und liefern auch die elektrische Energie an Bord des Space Shuttles (seit 1981).

Obwohl Lösungsansätze existieren, die CO₂-Empfindlichkeit der Elektroden zu verbessern, und ähnliche Kosten wie bei anderen Niedertemperatur-Brennstoffzellen erwartet werden können, bleibt dennoch festzuhalten, dass die meisten Forschungsgruppen in Europa ihre Aktivitäten im Bereich der Alkalischen Brennstoffzellen eingestellt haben. Ein wichtiger Grund dafür ist die relativ begrenzte Lebensdauer im Bereich von etwa einem Jahr, die sich mit den kostengünstigen Materialien, wie Raney-Nickel (Katalysatormaterial), nicht weiter verlängern ließ. Die umfangreichen Erfahrungen und Erkenntnisse können aber für verwandte Techniken genutzt werden. Hier ist z.B. die Membran-Brennstoffzelle zu nennen, die ein ähnliches Anwendungsspektrum aufweist, und der deutlich größere Marktchancen einge-räumt werden.

Alkalische Brennstoffzellen wurden vorwiegend für die Raumfahrt und Militärtechnik entwickelt. Sie besitzen geringe Bedeutung für die dezentrale Energieversorgung bei Verwendung von kohlenstoffstämmigen Energieträgern.

1.4.2 Polymermembran-Brennstoffzelle (PEFC)

Im Gegensatz zu alkalischen Systemen besteht der Elektrolyt in Membran-Brennstoffzellen aus einer protonleitenden Folie auf der Basis eines perfluorierten, sulfonierten Polymers. Bei der PEFC übernimmt die Membran gleichzeitig die Funktion des Elektrolyten, des Katalysatorträgers für die anodischen und kathodischen Elektrokatalysatoren und des Separators für die gasförmigen Reaktanden. Die folgenden Teilreaktionen laufen bei einer Polymermembran-Brennstoffzelle ab:



Die Arbeitstemperatur liegt zwischen 60 und 80 °C, wobei Membran-Brennstoffzellen ein exzellentes Kaltstartverhalten aufweisen. Die Zelle arbeitet mit Wasserstoff oder mit kohlendioxidhaltigem Reformatgas und kann kathodenseitig mit Luft betrieben werden. Auf Grund der guten Leitfähigkeit und der geringen Membrandicke von lediglich 50 bis 150 µm erreichen PEFC sehr hohe Leistungsdichten. Von der kanadischen Fa. Ballard werden bei einer Zellspannung von 0.5 V im Betrieb mit Wasserstoff und Sauerstoff bei 3.5 bar Betriebsdruck unter Verwendung einer Membran der Fa. Dow Chemical Stromdichten von 4.3 A/cm² berichtet. Die Bipolplatten, welche die Einzelzellen innerhalb eines Stacks elektrisch verbinden, werden aus Graphit, Stahllegierungen oder elektrisch leitfähigen Composite-Werkstoffen gefertigt.

Das bei der Reformierung von kohlestämmigen Brennstoffen entstehende Reformatgas enthält selbst nach einer Wassergas-Shift-Konvertierung noch ca. ein Prozent Kohlenmonoxid (CO), das ein starkes Katalysatorgift für die PEFC darstellt. Da CO am anodischen Edelmetallkatalysator Platin adsorbiert wird, würde es diesen nach kurzer Zeit deaktivieren. PEFC-Systeme benötigen daher eine aufwendige Gasreinigungsstufe, die den CO-Gehalt im Reformatgas bis auf ca. 20 ppm reduziert.

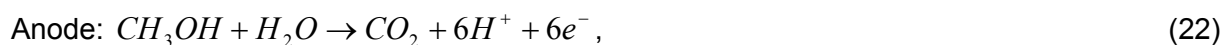
Membran-Brennstoffzellen wurden ursprünglich von der amerikanischen Fa. General Electric Mitte der 50er Jahre für Raumfahrtprojekte entwickelt. So wurden PEFC-Zellen im Gemini Raumfahrtprogramm (1962-1966) in bemannten Raumflügen als Energiequelle eingesetzt.

Die Entwicklung der PEFC wird in den letzten Jahren stark forciert, da sie für den Elektrotraktionsbereich hervorragend geeignet ist.

Die Entwicklungsarbeiten für stationäre Membran-Brennstoffzellen-Systeme können in die Leistungsbereiche Blockheizkraftwerk (200-300 kW_{el}) und Brennstoffzellen-Kleinsystem (1-5 kW_{el}) eingeteilt werden. In letzter Zeit wird jedoch auch die PEFC als Stromversorgung für portable Elektronik und als Batterieersatz entwickelt.

1.4.3 Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC)

Methanol gilt als ein sehr vorteilhafter Treibstoff für die Anwendung im Fahrzeugbereich und kann ohne den Zwischenschritt der Reformierung direkt elektrochemisch oxidiert werden. Hier setzt auch die Motivation für die Entwicklung der sogenannten Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC) an, die im Prinzip ähnlich wie eine PEFC aufgebaut ist, jedoch wird die Anode direkt mit Methanol beaufschlagt, während die Kathode mit Sauerstoff (Luftsauerstoff) versorgt wird. Die reversible Zellspannung U_{rev}^0 bei der Methanoloxidation liegt mit 1.215 V sehr nah bei der der Wasserstoffoxidation mit 1.23 V. Die elektrochemischen Zellreaktionen lauten:



Die Entwicklung der Direktmethanol-Brennstoffzelle ist jedoch noch mit einigen technischen Schwierigkeiten behaftet. Ein wesentliches Problem stellt dabei das Methanol dar, welches durch Diffusionsprozesse und Elektroosmose⁷ durch die Membran von der Anoden- auf die Kathodenseite gelangt. Des weiteren sind noch die zu geringe katalytische Aktivität der Kathode durch Mischpotentialbildung zu nennen. Insbesondere für das geforderte Kaltstartverhalten hat die DMFC systembedingt Vorteile gegenüber einer PEFC mit kohlestämmigem Brennstoff, da kein Reformier auf Betriebstemperatur gebracht werden muss. Der relativ einfache Aufbau des Gesamtsystems spricht ebenfalls für den Einsatz als Fahrzeugantrieb. Allerdings befindet sich die DMFC zur Zeit noch im Laborstadium, im kW-Maßstab liegen praktisch keine Erfahrungen vor. Man kann jedoch aufgrund der Leistungssteigerung der DMFC in den letzten Jahren vermuten, dass es noch ein großes Entwicklungspotential gibt. Besonders die Entwicklung einer geeigneten Membran, die die Problematik der Methanol-permeation (cross over) beseitigt, würde eine beträchtliche Leistungssteigerung der DMFC bewirken.

1.4.4 Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)

Die Verwendung einer Säure als Elektrolyt erlaubt der Phosphorsäuren Brennstoffzelle wie schon der Membran-Brennstoffzelle den Einsatz von CO₂-haltigen Reaktionsgasen, da CO₂ nicht mit der Säure reagiert. Die Zellreaktionen entsprechen denen der PEFC. Neben dem eigentlichen Brennstoffzellenstack bilden der Reformier, die Gasreinigung des Reformats von CO, Wärmetauscher zur Wärmerückgewinnung und Wärmeauskopplung sowie der elektrische Betriebsteil die wichtigsten Systemkomponenten für einen Betrieb mit Erdgas oder Methanol.

⁷ Osmose: (chem.) Das Eindringen eines Lösungsmittels in eine konzentrierte Lösung durch eine halbdurchlässige Membran.

Die PAFC besitzt auf Grund der höheren Arbeitstemperatur von etwa 200 °C eine gegenüber der PEFC deutlich bessere CO-Toleranz. Die geforderte Gasqualität mit einem Kohlenmonoxidgehalt von weniger als etwa 1 Mol-%⁸ kann durch einfaches Nachschalten von Shift-Konvertierungsstufen hinter den Reformer erreicht werden. Die Elektroden einer PAFC bestehen aus einem Gewebe von Kohlenstofffasern, auf die Ruß-geträgerter nanodisperser⁹ Platinkatalysator aufgebracht wird. Die als Elektrolyt verwendete Phosphorsäure wird nicht wie bei der alkalischen Brennstoffzelle als Flüssigkeit durch die Zelle gepumpt, sondern als Gel in einer geflechtartigen Matrix aus teflungebundenem Siliziumkarbid fixiert. Bei der PAFC bestehen die Bipolplatten aus Graphit, in das Gasverteilungs Kanäle eingearbeitet sind.

Die Phosphorsäure-Brennstoffzelle ist heute der kommerziell am weitesten entwickelte Brennstoffzellentyp. Insbesondere sind hier die Entwicklungen bei der amerikanischen Fa. ONSI zu nennen.

1.4.5 Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle (MCFC)

Die Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle (MCFC) wird bei ca. 650 °C betrieben und gehört zu den Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Die MCFC integriert Kohlendioxid in die Zellreaktion und ist daher sehr gut geeignet zur Verstromung von kohlenwasserstoffhaltigen Gasen. Bei der MCFC laufen die folgenden Zellreaktionen ab:



Der Elektrolyt besteht aus schmelzflüssigen Alkalikarbonaten (Li_2CO_3 , K_2CO_3), die in einer keramischen Matrix aus $LiAlO_2$ fixiert werden. Als Elektrodenmaterial wird bei beiden Elektroden Nickel verwendet, d.h. auf Edelmetalle kann verzichtet werden. Das kathodische Nickelmaterial oxidiert beim Anfahren der Zelle zu Nickeloxid NiO . Eine Besonderheit der MCFC ist die Zumischung des CO_2 -haltigen Anodenabgases in das Kathodeneintrittsgas. Das Kohlendioxid verbindet sich in der kathodischen Reaktion mit Sauerstoff zu Karbonationen (CO_3^{2-}), dem Träger der Ladung durch den Elektrolyten.

Die Schwierigkeiten bei der technischen Realisierung liegen besonders in der Werkstoffauswahl, da die hochkorrosiven Karbonatschmelzen viele Materialien angreifen. Ein weiteres Problem stellt die langsame Auflösung (Degradation) der NiO -Kathode im Elektrolyten dar. Die von der NiO -Kathode abgegebenen Ni-Ionen lösen sich in der Karbonatschmelze und werden in der keramischen Matrix im Bereich der Anode wieder zu metallischem Nickel reduziert. Durch diese Ni-Präzipitate¹⁰ besteht die Gefahr eines Kurzschlusses von der Anode zur Kathode quer durch die Matrix.

International wird die Einsetzbarkeit der MCFC-Technologie in einer Reihe von Projekten in einem Leistungsbereich von einigen hundert kW bis in den MW-Bereich hinein demonstriert.

⁸ Molprozent

⁹ Dispersion: (chem.) Feinste Verteilung eines festen oder flüssigen Stoffes (Dispersum) in einem anderen flüssigen oder gasförmigen (Dispersens) ohne molekulare Verbindung als Aerosol, Emulsion, Kolloid oder Suspension. Aerosol: Gas (oder Luft), das fein verteilte flüssige oder feste Partikel enthält. Emulsion: (chem.) Feinste Verteilung einer Flüssigkeit innerhalb einer nicht mit ihr mischbaren Flüssigkeit. Kolloid: Äußerst fein verteilte Partikel in einer Flüssigkeit oder einem anderen Stoff. Suspension: (chem.) Feinste Verteilung fester Teilchen in einer Flüssigkeit.

¹⁰ Präzipitat: (chem.) Niederschlag, Bodensatz einer Ausfällung; präzipitieren: (chem.) Ausflocken, ausfällen.

In Europa hat sich zur Kommerzialisierung von MCFC-Blockheizkraftwerken unter der Führung der MTU Friedrichshafen GmbH ein Firmenkonsortium gebildet. In den USA arbeitet die Fa. Fuel Cell Energy (vormals Energy Research Corporation) an verschiedenen Demonstrationsprojekten, in Japan wird von den Firmen Hitachi, IHI und Mitsubishi Electric ebenfalls sehr intensiv an der MCFC gearbeitet.

1.4.6 Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)

Auch die oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC) gehört zu den Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Sie arbeitet im Temperaturbereich zwischen 800 und 1000 °C. Die Zellreaktionen lauten:



In der SOFC wird eine oxidionenleitende Keramik aus Yttrium-stabilisiertem Zinkoxid als fester Elektrolyt eingesetzt. Diese Mischoxid-Keramik zeigt bei Temperaturen oberhalb von 750 °C eine gute O^{2-} -Ionenleitfähigkeit bei gleichzeitiger Gasundurchlässigkeit und vernachlässigbarer Elektronenleitung. Der anodische Katalysator besteht aus Nickel-Zirkonoxid und auf der Kathodenseite werden Mischoxide wie z.B. Lanthan-Strontium-Manganat eingesetzt. Auf Grund des geringen Elektrolytwiderstandes und der durch die Temperatur beschleunigten Zellreaktionen sind bei der SOFC höhere Stromdichten möglich als bei der MCFC. Bei einer Zellspannung von 0.7 V berichtet Siemens Westinghouse von Stromdichten bis zu 1 A/cm².

Weltweit arbeiten eine Reihe von Firmen und Forschungseinrichtungen an der Entwicklung der SOFC-Technologie. Die großtechnische Realisierung im MW-Bereich wird in den nächsten 10 bis 15 Jahren angestrebt. Derzeit werden noch viele grundlegende Fragen, die vor allem die Verarbeitung der keramischen Strukturen betreffen, bearbeitet. Insbesondere das Ausdehnungsverhalten der keramischen und metallischen Materialien muss aufeinander abgestimmt werden um thermische Spannungen zu minimieren. Es gibt verschiedene Zellkonzepte, wobei besonders zwischen dem Röhrenkonzept und dem Flachzellenkonzept unterschieden wird. Siemens Westinghouse ist bei der SOFC führend und verfolgt sehr intensiv das Röhrenkonzept. Die einzelnen Zellen bestehen aus Röhren mit bis zu 1.5 m Länge bei einem Nenndurchmesser von 2.2 cm, die zu Bündeln zusammengeschaltet werden. Im Inneren der Röhren strömt die Luft und außen der Brennstoff. Das Flachzellenkonzept, das z.B. von Siemens lange Zeit verfolgt wurde, lehnt sich an den planaren Aufbau der anderen Brennstoffzellentypen an, in dem ebene Strukturen in bipolarer Anordnung aufeinander gestapelt werden. Dieses Konzept bildet auch die Basis für die Schweizer Fa. Sulzer Hexis, die zurzeit ein Klein-BHKW für die Hausversorgung entwickelt.

1.5 Brennstoffzellensysteme

[3], [7], [8]

Elektrochemische Zellen benötigen, um einen Strom liefern zu können, eine umfangreiche Infrastruktur, womit eine vollständige Brennstoffzellen-Anlage aus den Komponenten Gas-aufbereitung, Gas- und Wärmemanagement, dem Zellstack und dem elektrischen Betriebsteil besteht. In Abbildung 5 ist ein solches Gesamtsystem einer Brennstoffzellen-Anlage stark vereinfacht dargestellt.

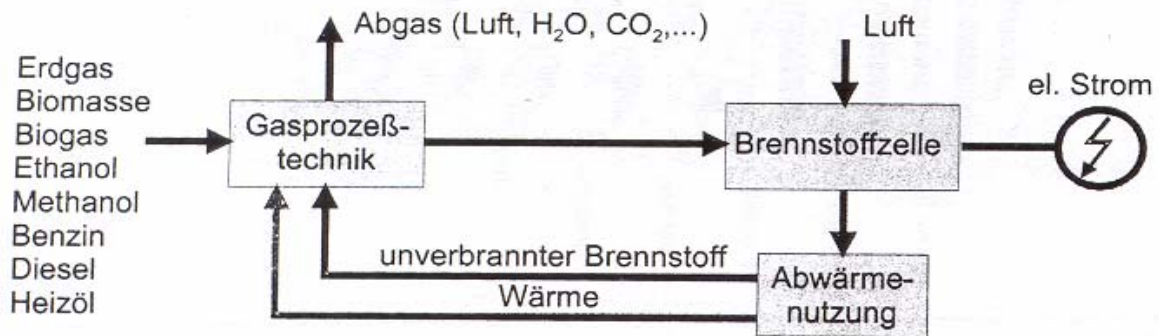


Abbildung 5 Brennstoffzellen-Gesamtsystem (als vereinfachtes Schema dargestellt, Quelle: [3]).

1.5.1 Brennstoffauswahl

Der Einsatz von reinem Wasserstoff als Brenngas für Brennstoffzellen und reinem Sauerstoff als Oxidans ist weder ökonomisch noch technisch einfach zu realisieren, da praktisch kein derartiges Verteilungssystem existiert. Daher werden Brennstoffzellen zum einen mit Luft als Oxidationsmittel, zum anderen - zumindest für eine gewisse Übergangszeit - mit kohlestämmigen Brennstoffen betrieben, die entweder direkt oder nach einer entsprechenden chemischen Umwandlung (siehe Kapitel 1.3) in der Brennstoffzelle umgesetzt werden.

Für stationäre Anwendungen ist eine Reihe von Brennstoffen prinzipiell geeignet, jedoch werden zur Zeit für die dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung in erster Linie Erdgas, Heizöl und Flüssiggas (z.B. Propan) als Energieträger betrachtet. Eine Auswahl denkbarer Brennstoffe ist in der Tabelle 3 mit einigen wichtigen Eigenschaften aufgelistet.

Brennstoff	Summenformel	unterer Heizwert kJ/kg	Spez. Gewicht g/l	Spez. Energie kJ/l	Siedepunkt bzw. -bereich °C	Zündgrenze bzw. -temperatur
Wasserstoff	H ₂	120.000	0,09	11	-252	4-74 vol.-%
Methanol	CH ₃ OH	20.000	792	15.900	64,5	3-36 vol.-%
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	26.970	789	21.300	78,3	4-14 vol.-%
Propan	C ₃ H ₈	46.300	2,01	93	-42	2,1-9,5 vol.-%
Erdgas	CH ₄	44.000	0,81	36	-162	5-13,5 vol.-%
Benzin	C ₈ H ₁₈	44.200	720	31.800	30-215	220 °C
Heizöl	C ₁₀ H ₂₂	42.600	830	35.360	170-390	240 °C

Tabelle 3 Auswahl möglicher Brennstoffe und deren wichtigen Eigenschaften (Quelle: [3]).

Werden Brennstoffzellen im mobilen Bereich angewendet, so muss man den Brennstoff transportieren. Die Wahl des zukünftigen Treibstoffes, für dessen Verteilung eine geeignete Infrastruktur entweder bereits verfügbar sein oder aber noch geschaffen werden muss, stellt eine fundamentale strategische Entscheidung dar. Wasserstoff kann flüssig, in Druckspeichern, in Metallhydriden oder langfristig vielleicht auch in Kohlenstoff-Nanofasern gespeichert werden. Auf Grund verschiedener Probleme wird Wasserstoff in der Zukunft vor allem für den Flottenbetrieb verwendet werden. Es wird aber auch über Methanol diskutiert, aus dem im Fahrzeug der erforderliche Wasserstoff mittels eines Reformers synthetisiert wird. In

Zukunft ist auch eine Verstromung des Methanols direkt in einer DMFC denkbar. Es müssen aber auch Benzin und Diesel als mögliche Treibstoffe genannt werden, die wie Methanol an Bord des Fahrzeugs in Wasserstoff umgewandelt werden müssen. Der Vorteil für dieses Konzept läge darin, dass die seit langem installierte Raffinerie- und Tankstelleninfrastruktur weiter genutzt werden kann. Im Vergleich Wasserstoff zu Methanol zeigt sich bei gleichem Energiegehalt ein deutlich höherer Volumenbedarf an. Im Vergleich zu Benzin, Dieselöl oder Ethanol ist dagegen das notwendige Speichervolumen für Methanol etwas ungünstiger.

1.5.2 Wirkungsgrade und Emissionen

[3]

Brennstoffzellen stehen als neuartige Stromerzeuger im Wettbewerb zu konventionellen Techniken, wie z.B. Dieselgeneratoren oder Gasturbinen. In Abbildung 6 sind die von den jeweiligen Brennstoffzellentypen erreichbaren Wirkungsgrade im Vergleich zu konkurrierenden Systemen dargestellt. Ersichtlich ist, dass sich Brennstoffzellen-Anlagen durch hohe Wirkungsgrade im kleinen Leistungsbereich unterhalb von etwa 100 kW im Vergleich zu den hier üblicherweise eingesetzten Verbrennungsmotoren auszeichnen. Im Leistungsbereich von 1 bis 10 MW konkurrieren Brennstoffzellen auch mit Gasturbinenanlagen und weisen hier ebenfalls deutliche Vorteile auf.

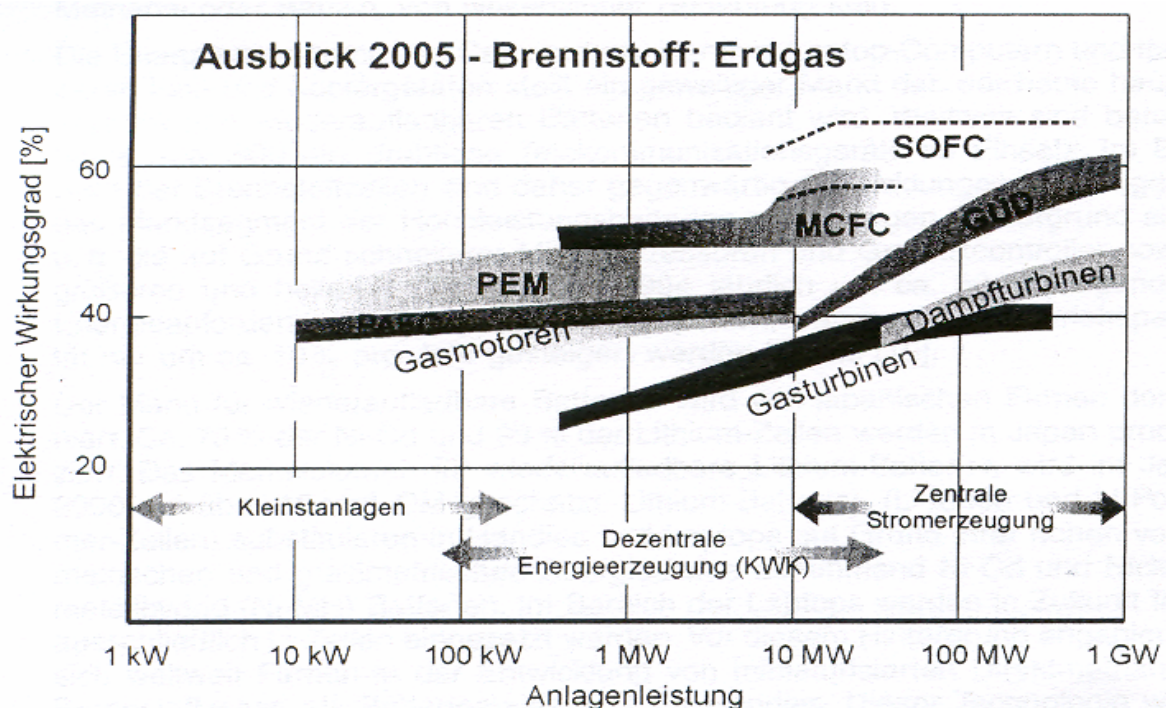


Abbildung 6 Elektrische Wirkungsgrade verschiedener Techniken zur Strom- und Wärmeenergieerzeugung auf Erdgasbasis (Quelle: [3], von GEC Alstom).

Brennstoffzellen, die mit Wasserstoff betrieben werden, weisen als einziges Reaktionsprodukt Wasserdampf auf. Die äußerst geringen Emissionen der mit Kohlenwasserstoffen (z.B. Erdgas) betriebenen Brennstoffzellen-Anlagen rühren daher letztlich von der vorgeschalteten Gasprozesstechnik zur Brenngasaufbereitung. Von besonderer Bedeutung sind hier die NO_x -Emissionen, die als wichtigste Komponente bei der Bildung des sogenannten Sommer-Smogs gelten.

1.6 Anwendungspotenzial von Brennstoffzellensystemen

[3]

Die Marktchancen von Brennstoffzellen als Konkurrenzsysteme von GuD-Anlagen im Leistungsbereich ab etwa 100 MW müssen angesichts der erheblichen Fortschritte der GuD-Anlagen mit Wirkungsgraden von fast 60 % eher zurückhaltend beurteilt werden. Insbesondere die günstigen Investitionskosten und die erprobte Langlebigkeit dieser Technik erschweren den Brennstoffzellen-Anlagen den Einstieg in den Markt der dezentralen Stromerzeugung in diesem Leistungsbereich.

Der BHKW-Markt dürfte sich kontinuierlich entwickeln, da die dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung in vielen Einzelfällen ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist.

Prinzipiell sind die Brennstoffzellen-Systeme auch zur Energieversorgung von kleineren Gebäuden, wie z.B. Einfamilienhäusern, geeignet. Stand-alone-Kleinsysteme können einzelne Haushalte mit Strom und Wärme versorgen. Auf Grund der niedrigen Betriebstemperatur und des relativ einfachen Aufbaus wird der Membran-Brennstoffzelle die Führung zuerkannt. Bei den Lebensdauerzielen von mehr als 40 000 Stunden werden mittel- bis langfristig Kostenziele von 255 €/kW_{el} angestrebt.

Der Fahrzeugantrieb wird derzeit als das wichtigste Anwendungsfeld der Membran-Brennstoffzelle angesehen, die auf Grund ihrer hohen Leistungsdichte und ihres großen Kostensenkungspotentials favorisiert wird. Neben der Fa. Ballard (Kanada), die derzeit wohl Marktführer auf diesem Gebiet sein dürfte entwickeln aber auch noch Unternehmen wie Toyota in Japan und General Motors in den Vereinigten Staaten eigene Systeme. Eine wichtige Entscheidung wird im Zusammenhang des künftigen Energieträgers für mobile Anwendungen fallen müssen, z.B. also Benzin oder Methanol. Wie bereits erwähnt existiert noch keine Infrastruktur für die Wasserstofftechnologie.

Im Leistungsbereich von 1 bis 500 Watt stellen Klein-Brennstoffzellen eine interessante Möglichkeit dar, als Einsatzgebiet könnte die Energieversorgung von Computer oder mobile Telekommunikationsgeräte angesehen werden. Im Leistungsbereich unter 10 Watt werden große Anstrengungen gemacht um z.B. die Energieversorgung von Handys zu übernehmen.

Geräte, die mit wiederaufladbaren Batterien betrieben werden, wie Handys, Laptop-Computer, tragbare Fax- und Kopiergeräte etc. stellen einen gewaltigen Markt für die Energieversorgung durch Brennstoffzellen-Systeme dar. Hintergrund sind die auf Grund schneller Mikroprozessoren und Graphikcontroller sowie größerer und helleren Displays seit 1994 jährlich um ungefähr 30 % ansteigenden Leistung von tragbaren PCs, während die Batteriekapazität nur um ca. 10 % pro Jahr gesteigert werden konnte.

Der Markt für wiederaufladbare Batterien wird von Japanischen Firmen dominiert. In Japan werden ca. 75 % der Ni-Cd und 99 % der Lithium-Zellen produziert. Lithiumbatterien verdrängen zunehmend wegen ihrer hohen volumetrischen und gravimetrischen¹¹ Energiedichte die Ni-Cd und Nickelmetallhydrid (Ni-MH) Batterien. Weltweit machen die Firmen jetzt sehr große Forschungsanstrengungen um eine miniaturisierte DMFC als Batterieersatz für z.B. Handies. Aufgrund höherer Energiedichten können wesentlich längere Betriebszeiten erreicht werden, das Nachfüllen kann in wenigen Minuten geschehen. Man kann also getrost behaupten das die Brennstoffzellentechnologie im Batteriesegment einen hochinteressanten Markt gefunden hat.

¹¹ Gravimetrie: (chem.) Das Verfahren der Gewichtsbestimmung eines Elementes in einer Mischung.

1.6.1 Virtuelles Kraftwerk

[3]

Es gibt einige technische und wirtschaftliche Beweggründe, Strom und Wärme direkt beim Verbraucher im wärmegeführten Betrieb zu erzeugen. Verfeinert man die Betriebsweise, indem das BHZ zu bestimmten Zeiten, in denen die Netzlast stark ansteigt und der Leistungsbezug im Netz Spitzen erreicht, auf Vollast schaltet und die Maximalmenge an Strom einspeist, kann das BHZ aus Sicht der Netzbetreiber teuren Spitzenstrom substituieren, den Lastgang glätten (Peak Shaving) und aus Sicht der Privatbetreiber wertvollen Spitzenstrom produzieren. Die parallel überproduzierte Wärme geht in einem Wärmespeicher. Diese Hybridfahrweise ist wirtschaftlich und gegenüber regenerativen Stromerzeugern (z.B. Wind, Photovoltaik), deren Stromproduktion von der Umwelt (Wetter) abhängen, von Vorteil. Nimmt man nun sehr viele solcher BHZs, verbindet man sie über Schnittstellen miteinander in einem zentralen Lastmanagement (Lastverteiler), kann man im weiteren Sinne von einem lokalen Kraftwerk sprechen, einem virtuellen Kraftwerk sozusagen.

1.6.2 Energie Dienstleistung

[3]

Durch die Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes in Europa werden neue Dienstleistungen für den Endabnehmer angeboten. Ein Großteil der Verbraucher von Strom und Wärme wollen sich nicht im Detail um die Technik kümmern sondern sind gerne dazu bereit diese Aufgabe an andere abzutreten. Am Markt kann man zunehmend Full-Service-Angebote beobachten, die neben der Energielieferung die kompetente Beratung, Finanzierung, Installation, Betrieb, Wartung, Instandhaltung sowie Abrechnung beinhalten. Dies gilt ebenso für gewerbliche Objektbetreiber (Wohnbaugesellschaften, Hausverwaltungen, Behörden etc.) als auch für ein noch unangetastetes Marktpotential an privaten Investoren im Bereich von Ein- und Mehrfamilienhausbereich. Die Altersstruktur der Kunden wird sich in den nächsten Jahren massiv zu den Senioren hin verschieben, die natürlich auf verstärkte externe Dienstleistungen zurückgreifen werden.

2. Polymermembran-Brennstoffzellen-Systeme

2.1 Einleitung

Unter den verschiedenen Brennstoffzellen-Technologien hat die Polymermembran-Brennstoffzelle (PEMFC) wegen ihrer hohen Leistungsdichte und niedrigen Betriebstemperaturen das vielfältigste Anwendungspotential: Bordstromversorgung in der Raumfahrt, Stromerzeugung für Elektroantriebe bis zur dezentralen Energieversorgung in kleineren bis mittleren Leistungsbereichen.

Der Begriff Polymermembran bezieht sich auf die Verwendung einer protonenleitenden Polymerfolie als Elektrolyt. In der Fachliteratur setzt sich auch zunehmend der Begriff PEM-Brennstoffzelle durch, wobei PEM für **P**olymer **E**lectrolyte **M**embrane steht.

2.2 Historisches zur PEM-Technologie

1839 wurde das Prinzip der Brennstoffzelle durch William Grove entdeckt.

1963 entwickelte General Electric (GE) ein 1 kW System das für alle sieben Raumflüge des Gemini-Programmes eingesetzt wurde. Als Elektrolyt wurde eine sulfonierte Polystyrolmembran verwendet.

1969 verwendete das von GE entwickelte System einen Prototypen der Fa. DuPont, Nafions, eine protonleitende Membran auf der Basis eines perfluorierten, sulfonierten Polymers. Diese kam in einem Biosatelliten zum Einsatz.

Mitte der 80er Jahre wurde die GE-Technologie auf UTC/Hamilton Standard übertragen und im Rahmen von Raumfahrt-Programmen weiterentwickelt.

1983 startete die kanadische Fa. Ballard Power Systems ihre Entwicklungsarbeit zu PEM-Brennstoffzellen. Ballard konzentrierte sich auf die Entwicklung von luftbetriebenen BZ. Nach wenigen Jahren konnte eine Verbindung von Methanol- bzw. Erdgas-Reformern erfolgreich von Ballard demonstriert werden.

1988 präsentierte Ballard mit der neuen DOW-Membran zum erstenmal Ergebnisse. Die von DOW-Chemical entwickelte Membran hatte einen sehr viel geringeren Elektrolytwiderstand als die bis dahin übliche Nafion-Membran (DuPont) und ermöglichte dadurch sehr viel höhere Leistungsdichten. Weitere neue Membranen wurden unter anderem von BAM (Ballard Advanced Materials), DuPont, Gore und Höchst entwickelt.

Die Ergebnisse mit neuen Membranen verbunden mit der Erfahrung im Luft- und Reformatbetrieb waren der Auslöser für den Entwicklungsboom in der PEM-Technik.

Ende der 80er Jahre starteten weltweite Entwicklungsprogramme wie das vom US-Department of Energy (DOE) finanzierte General Motors Programm mit dem Ziel ein Elektrofahrzeug zu entwickeln. Auch Daimler Benz startete seine Forschung in dieser Zeit und trat 1993 in eine Kooperation mit Ballard Power Systems ein.

In der Zwischenzeit haben fast alle Automobilfirmen weltweit umfangreiche Entwicklungsprogramme für Brennstoffzellen-Fahrzeuge gestartet.

2.3 Funktionsweise und Aufbau der PEM-Brennstoffzelle

[3]

Das Herzstück einer PEM (Abbildung 7) ist die sogenannte Elektrodeneinheit. Sie besteht aus folgenden Komponenten:

- Ca. 0.1 mm dicken protonenleitenden Elektrolytfolie, die im Betriebszustand einen Wassergehalt zwischen 20 und 40 % und eine spez. Leitfähigkeit von ca. 0.1 S/cm aufweist.
- Elektrokatalysatoren an beiden Seiten der Folie aufgebracht. Dabei handelt es sich um Edelmetalle wie z.B. Platin für die Sauerstoffreduktion als auch für die Wasserstoffoxidation. Die Edelmetallbelegung konnte von 4 mg/cm² auf unter 0.1 mg/cm² gesenkt werden.
- Poröse Elektroden mit einer aktiven Katalysatorschicht, denen die Gase Wasserstoff bzw. Sauerstoff zugeführt werden und von wo aus die Produkte Strom, Wärme und Wasser abgeführt werden.

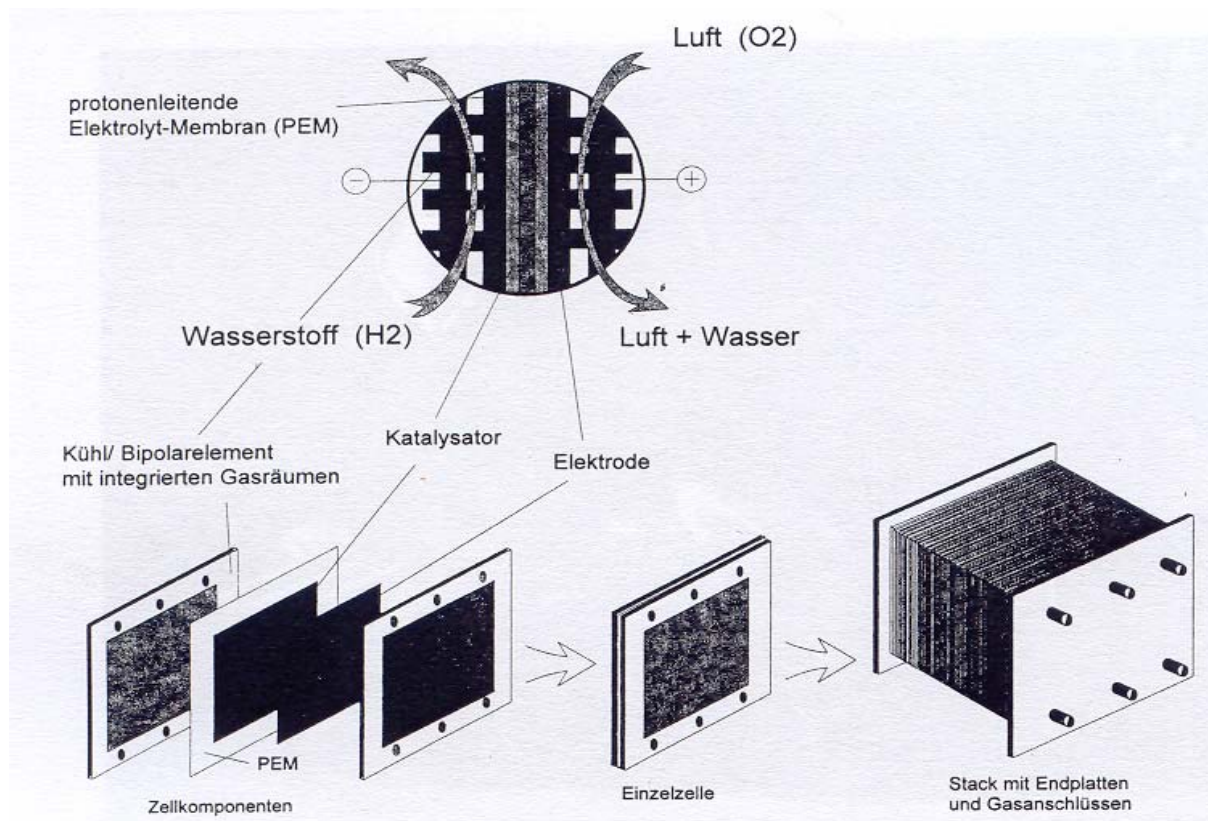


Abbildung 7 PEM-Brennstoffzelle, schematischer Aufbau (Quelle: [3]).

Die Abtrennung zwischen den einzelnen Zellen erfolgt durch Bipolarplatten, die folgende Funktion übernehmen:

- Die Elektroden werden elektrisch kontaktiert sowie Weiterleitung des Stromes zur Nachbarzelle (Serienschaltung der Zellen).
- Versorgung der Zellen mit Reaktionsgasen und Abtransport des erzeugten Wassers über eine entsprechende Kanalstruktur.
- Weiterleiten der bei der Reaktion entstehenden Abwärme an die benachbarte Kühlkammer.
- Abdichten der verschiedenen Gas- und Kühlkammern gegeneinander und nach außen.

Die oben genannten Komponenten werden zwischen zwei Endplatten in Filterpressenbauweise zu einem sogenannten Zellenstapel, meist mit dem englischen Begriff „Stack“ bezeichnet, zusammengebaut. Zu den Endplatten gehören auch noch die Stromabgriffplatten, Zuganker und Gas- bzw. Kühlwasseranschlüsse.

Typische Kenndaten einer PEM-Brennstoffzelle sind:

- Flächenleistung bis etwa 1 W/cm^2 bei Stromdichten bis zu 2 A/cm^2 , Luft wird dabei als Oxidans verwendet. Mit reinem Sauerstoff können noch deutlich höhere Werte erzielt werden.
- Eine Einzelzelle hat je nach Bauprinzip eine Dicke zwischen 2 und 5 mm und Außenabmessungen bis etwa $400 \times 400 \text{ mm}^2$.
- Etwa 100 bis 200 Einzelzellen werden zu einem sog. Stack zusammengefasst. Mehrere Stacks werden in Serie oder parallel zu Modulen der gewünschten Leistung und Spannung verschaltet.

- Üblicherweise werden PEM-BZ bei Temperaturen zwischen 70 und 90 °C und bei Gasdrücken zwischen Umgebungsdruck und 5 bar betrieben.

In Abbildung 8 sind einige typische Stromdichte/Spannungskennlinien einer Einzellzelle aufgetragen.

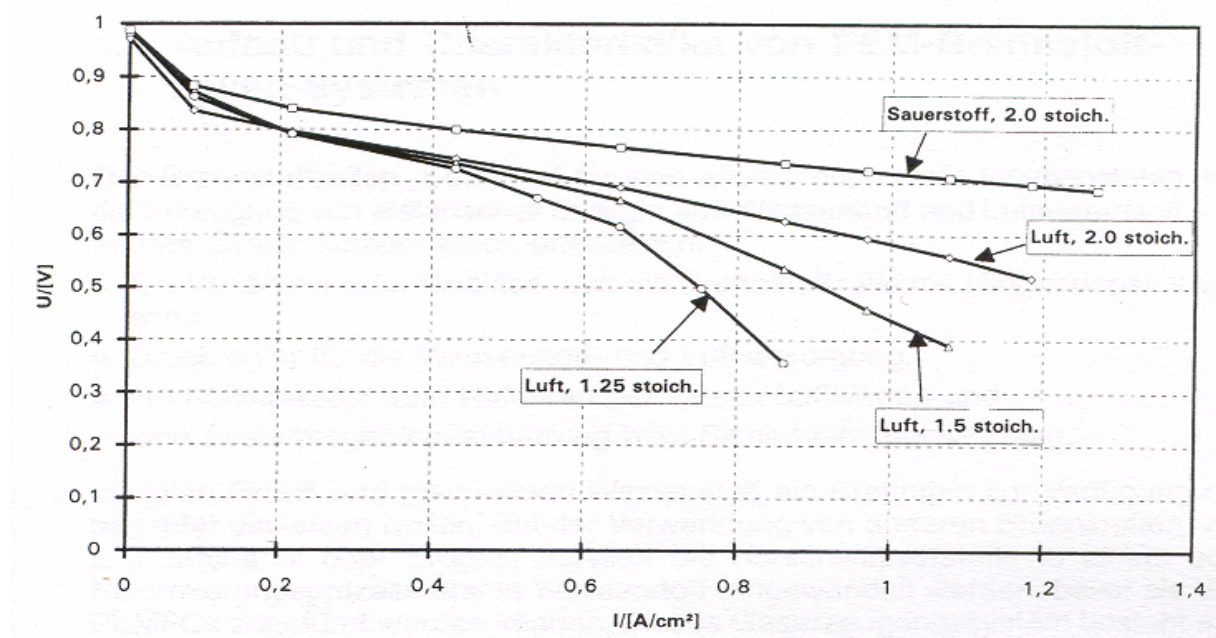


Abbildung 8 Stromdichte/Spannungskennlinien einer PEM-Brennstoffzelle unter verschiedenen Betriebsbedingungen (Quelle: [3]).

2.4 Aufbau und Charakteristika von PEM-Brennstoffzellen-Systemen

[3]

Für die Erzeugung von elektrischer Energie aus Wasserstoff und Luftsauerstoff sind weitere Systemkomponenten erforderlich:

- Ein Verdichter oder Gebläse, das die Brennstoffzelle mit Umgebungsluft versorgt,
- Druckregler für die Wasserstoff- und Luftversorgung,
- Kühlkreislauf zum Abführen der Überschusswärme und
- eine Systemregelung/-steuerung bzw. Sicherheitsüberwachung.

In vielen Fällen wird man keinen Wasserstoff direkt als Brenngas zur Verfügung haben oder einsetzen wollen. Bei der Verwendung von z.B. Methanol oder Erdgas müssen die Kohlenwasserstoffe in einem sog. Reformierungsprozess erst in Wasserstoff umgewandelt werden, bevor sie dem PEM-System zugeführt werden kann.

Das Gaserzeugungssystem besteht aus einer Dosiereinheit mit Verdampfer, dem Reaktor für die Wasserdampfpreformierung, einer Gasreinigung sowie einem katalytischen Brenner zur Bereitstellung der Prozesswärme für den endothermen Reformierungsprozess.

Häufig wird die partielle Oxidation verwendet, bei der dem Brenngas Luft zudosiert wird. Dies führt zwar zu einem einfacheren Reaktoraufbau, hat aber den Nachteil des geringeren Systemwirkungsgrades.

Da die Brennstoffzelle nur Gleichstrom erzeugt, wird in der Regel noch ein DC/AC-Wandler (Wechselrichter) oder eine entsprechende Leistungselektronik zur Ansteuerung eines E-Motors (GM) nachgeschaltet.

Die PEM-Technologie weist folgende Charakteristika auf:

- Geringes Einbauvolumen und Gewicht, reduzierte Materialkosten (Katalysatoren, Elektroden etc.).
- Bei Raumtemperaturen stehen bereits 50 % der max. Leistung zur Verfügung, die Aufheizphase dauert nur wenige Minuten (vgl. FC 1200 System: 30 Minuten).
 - Einfacheres und schnelleres An- und Abfahren, die Leistung ist sofort verfügbar.
 - Vorteile bzgl. der verwendeten Baumaterialien (geringere Korrosionsproblematik und Kosten, höhere Lebensdauer).
 - Einfache Dichtungstechnik.
 - Erprobte Kühlkreisläufe der heutigen Verbrennungsmotoren können genutzt werden.
- Eine 0.1 mm starke Kunststoffolie dient als Elektrolyt, es werden keine hochkorrosiven Säuren, Laugen oder Salze verwendet:
 - Kein „Verbrauch“ des Elektrolyten.
 - Korrosionsprobleme durch den Elektrolyten, insbesondere in den peripheren Anlagenteilen wie Ventile, Pumpen und Wärmetauscher treten nicht auf.
 - Differenzdrücke zwischen den Reaktanden sind möglich, insbesondere bei Druckbetrieb ist keine aufwendige Differenzdruckregelung erforderlich.
 - Hohe Betriebsspannungen ohne Leck- und Kurzschlussströme sind möglich
 - Einfaches „Handling“ bei der Herstellung.
- Die PEM-Technik kann sehr einfach bei erhöhtem Druck betrieben werden.
 - Eine deutliche Zunahme der Leistung (Wirkungsgrad bzw. Leistungsdichte).
 - Kompakte Bauweise der gesamten Anlage, insbesondere das Volumen der peripheren Bauteile wie Rohrleitungen und Wärmetauscher ist umgekehrt proportional zum Betriebsdruck.
 - Kostenvorteile insbesondere für periphere Anlagenteile.
- Die PEM-Zellen können bei hohen Spannungen betrieben werden. Gute Betriebserfahrungen existieren bis 1000 Volt. Dies bedeutet für die Leistungselektronik und Elektroantriebe:
 - Niedrige elektrische Verluste,
 - Gute spezifische Leistungsdichten und
 - Geringe Kosten
- PEM-Brennstoffzellensysteme können über den gesamten Leistungsbereich (Leerlauf bis Vollast) mit hoher Dynamik betrieben werden. Einschränkungen bzgl. des Spannungs- oder Lastbereiches aufgrund von Korrosionsproblemen gibt es nicht. Das An- und Abfahren kann einfach und schnell erfolgen. Es besteht auch ein hohes Maß an Überlastfähigkeit.
- Brennstoffzellensysteme können modular aufgebaut werden. Dadurch können Systeme mit mehreren 100 kW einfach realisiert werden.

- Autonom arbeitende Systeme konnten erfolgreich in Bussen als auch in erdgasbetriebenen BHKWs eingesetzt werden.

2.5 Anwendung in mobilen Systemen

[3], [38]

Verwendet man Brennstoffzellen nicht in Spezialgebieten wie U-Boot Antriebe oder für die Raumfahrt sondern setzt sie als Massentransportmittel ein, so nehmen die Kosten einen wesentlichen Stellenwert ein.

Geringes Volumen und Masse haben ebenfalls einen hohen Stellenwert als Entwicklungsziel, da die Leistungsdichte eines Verbrennungsmotors inzwischen in einem Bereich von 1 kW/kg liegt.

Bei Nutzfahrzeugen ist in der Regel eine etwas günstigere Einbauposition vorhanden. So konnte bei den bisherigen Brennstoffzellen-Bussen das System im Einbauraum des Dieselaggregates untergebracht werden. Tanks und einige Nebenaggregate fanden auf dem Dach ausreichend Platz.

Zusätzlich kommt das sehr hohe Drehmoment von E-Motoren bei der Auslegung zu Hilfe:

Bei E-Antrieben bewirkt der günstige Drehmomentverlauf im niedrigen Drehzahlbereich im Vergleich zu Verbrennungsantrieben bei gleicher Motorleistung ein deutlich besseres Beschleunigungsvermögen. Darüber hinaus ist der E-Antrieb leise und ruckfrei und benötigt kein mehrstufiges Getriebe, was zu einer Komfortsteigerung führt.

Die üblichen Betriebsdauieranforderungen von 5000 bis 6000 h für PKW sind auch für Brennstoffzellensysteme kein Problem. Die Zahl der Betriebszyklen spielt im Vergleich zu Batterieautos keine Rolle.

Die Umwelteinflüsse müssen bei der Systemkonzeption auch entsprechend berücksichtigt werden. Vibrationen, Stoßbelastungen, Umgebungstemperaturen von -40 °C bis $+50\text{ °C}$ sind zu bewältigen. Besondere Anforderungen werden dabei an das Kaltstartverhalten und den Frostschutz gestellt.

3. Emissionen

[45]

Allgemeines zu Emissionen

MAK ist die **maximale Arbeitsplatz-Konzentration** für den Umgang mit chemischen Stoffen.

Es ist die ermittelte Grenzkonzentration, die nach dem jeweiligen Stand des Wissens als erträgliche oder zumutbare Höchstkonzentration für einen gas-, dampf- oder staubförmigen Stoff am Arbeitsplatz bei täglich 8-stündiger Arbeit angesehen werden kann.

Die **Maximale Immissions-Konzentration (MIK)** ist ein Zahlenwert zur Begrenzung des Gehalts an luftfremden Stoffen (Gase, Dämpfe, Schwebstoffe, Stäube, die durch industrielle oder gewerbliche Anlagen in die Luft gelangen). Der MIK-Wert wird von der VDI-Kommission¹² "Reinhaltung der Luft" erarbeitet. Es werden jeweils kurzfristige und dauernde

¹² Verein Deutscher Ingenieure

Einwirkungen festgelegt, die nach heutigen Erfahrungen für Menschen, Tiere und Pflanzen keine nachteiligen Wirkungen haben. MIK-Werte sind nicht rechtsverbindlich.

Der **Biologische Arbeitsstoff-Toleranzwert (BAT-Wert)** wird von der Senatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe festgelegt. Er beschreibt die für den Umgang mit chemischen Arbeitsstoffen ermittelte höchstzulässige Menge, die über die Lunge und/oder andere Körperoberflächen in den Körper gelangt und nach heutigem Wissensstand die Gesundheit der Beschäftigten bei durchschnittlich achtstündiger Arbeitszeit nicht beeinträchtigt. Die Schadstoffaufnahme wird durch Analysen im biologischem Material (Blut, Urin, Ausatemungsluft) kontrolliert.

Die Einhaltung der **Technischen Richtkonzentration (TRK)** am Arbeitsplatz soll das Gesundheitsrisiko vermindern. Sie wird für krebserzeugende und erbgutverändernde Gefahrenstoffe aufgestellt, da es für diese Stoffe keine MAK-Werte gibt. Der TRK-Wert wird vom Ausschuss für gefährliche Arbeitsstoffe beim Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung (Deutschland) erstellt.

Die Technische Richtkonzentration ist diejenige Konzentration eines Gefahrenstoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft, die für die zu treffenden Schutzmaßnahmen und die messtechnische Überwachung am Arbeitsplatz heranzuziehen ist. Die Richtwerte gibt es für so gefährliche Stoffe wie Asbest oder Benzol.

3.1 Grenzwerte für luftverunreinigende Stoffe

- Emissionsgrenzwerte (z.B. Stäube, Chlor, Benzol, etc.).
- Immissionswerte 1 (TA Luft), Jahresmittelwert aus Halbstundeneinzelmessungen.
- Immissionswert 2 (TA Luft), 98-Perzentilwert aus Einzelmessungen.
- Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK), Konzentration eines bedenklichen Stoffes in Luft am Arbeitsplatz, von der nach arbeitsmedizinischer Erfahrung anzunehmen ist, dass sie auch bei achtstündiger Arbeitszeit der Gesundheit nicht schadet.
- Technische Richtkonzentration (TRK) gilt bei krebserregenden Arbeitsstoffen.
- MIK; gilt für Innenräume (Durchschnittsbürger hält sich zu 90 % in geschlossenen Räumen auf).

Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft

TRK ist nicht bekannt und es kann auch nicht ermittelt werden welche Konzentration unbedenklich ist.

Effekt des Synergismus: Stoffgemische können zu höherer Schädigung führen als Summe der Einzelgemische. SO₂ und NO_x führen bei Pflanzen zu Schädigungen (die Einzelsumme ist 5-10 fach so groß).

3.2 Ermittlung der Dosis-Wirkungsbeziehung

Die Ermittlung erfolgt durch folgende Punkte in der Aufzählung:

- Tierexperimente,
- Untersuchungen an Zellkulturen,
- Auswertung von Morbiditäts- und Mortalitätsstatistiken,
- Untersuchungen in Klimakammern (Pflanzenschädigung) und
- Feldversuche mit Pflanzen plus Immissionsmessungen.

Einwirkungen können zu akuten Schädigungen (kurze Einwirkungsdauer mit hoher Schadstoffkonzentration) bzw. zu chronischen Schäden (lang andauernder Einwirkung geringer Schadstoffkonzentration) führen.

Die Einwirkung der luftverunreinigenden Substanzen auf den Menschen erhält man durch:

1. Mortalität: Sterberate definierter Personengruppe.
2. Morbidität: relative Häufigkeit von Erkrankungen in einer definierten Patientengruppe.

3.2.1 Kohlenmonoxid CO

CO ist ein Gas ohne Farbe, Geruch und Geschmack. Als Hauptquelle sind die Verbrennungsprozesse genannt. Eingeatmetes CO verdrängt Sauerstoff aus dem Blut, da seine Bindung an das Hämoglobin ca. 300-mal stärker als die von Sauerstoff ist. Die Symptomatik, die Folge der verminderten Sauerstofftransportkapazität des Blutes ist stark konzentrationsabhängig: zwischen 5 und 30 Prozent Hämoglobin-CO zeigen sich Sehstörungen, Kopfschmerzen, Mattigkeit und Schwindel; höhere Konzentrationen bedingen Lähmung, Bewusstlosigkeit und schließlich den Tod (ab 60 Prozent Hämoglobin-CO). Aufgrund der sehr allgemeinen Symptome sind CO-Vergiftungen nur schwer als solche erkennbar. Anfällig für CO-Effekte sind Herz-Kreislauf-Patienten, da sie einen Sauerstoffmangel schlechter ausgleichen können.

Entscheidend für die Risikobeurteilung von CO ist die aktuelle Konzentration. Der MAK-Wert liegt bei 30 mg/m³ (=33 mg/m³). In schlecht belüfteten, verkehrsreichen Straßenfluchten besonders bei austauscharmen Wetterlagen (Wintersmog, Inversionswetterlage) werden Spitzenkonzentrationen von 1 bis 10 ppm gemessen. In Reinluftgebieten werden Kohlenstoffkonzentrationen zwischen 100 und 150 ppb gemessen. Die Smogverordnung sieht als Vorwarnstufe 30 mg/m³, als Alarmstufe 1 45 mg/m³ und als Alarmstufe 2 60 mg/m³ vor.

Rund 98 Prozent aller Kohlenstoffemissionen sind natürlichen Ursprungs. Anthropogene Hauptemissionsquelle von Kohlenstoff ist der Straßenverkehr. Hohe spezifische Kohlenstoffemissionen weisen Ofenheizungen und kleine Anlagen zur Holzverbrennung (Heizung) auf. Die Emissionen an CO können durch Nachverbrennung und Katalysatoren vermindert werden.

IW 1 Wert: 10 mg/m³.

IW 2 Wert: 30 mg/m³.

MIK Wert: 50 mg/m³ (Halbstundenwert).

MAK Wert: 33 mg/m³.

Innenstadt ca. 2 mg/m³ (1.7 ppm).

Volumenprozent: ppm (1 cm³ in 10⁶ cm³) ppb.

Massenkonzentration: mg/m³.

$$\text{Massenkonzentration} = \frac{\text{Volumsprozent} \cdot M}{22.41}, \quad (28)$$

$$\text{Volumsprozent} = \frac{\text{Massenkonzentration} \cdot 22.41}{M}. \quad (29)$$

$$1 \text{ mol ideales Gas} = 22.41 \text{ Liter}. \quad (30)$$

Berechnungsbeispiel:

Die Massenkonzentration von Kohlenmonoxid (CO) beträgt $10 \text{ mg/m}^3 = 10 \text{ } \mu\text{g/l}$. (31)

Die relative Atommasse A_r von Kohlenstoff C = 12.01 g/mol, Sauerstoff O = 16.0 g/mol. (32)

Die relative Molekülmasse M_r beträgt $C + O = 12.01 + 16.0 = 28.01 \text{ g/mol}$. (33)

$$\text{Volumsprozent} = \frac{10 \frac{\mu\text{g}}{\text{l}} \cdot 22.41 \frac{\text{l}}{\text{mol}}}{28 \cdot 10^6 \frac{\mu\text{g}}{\text{mol}}} = 8.0035 \cdot 10^{-6} = 8 \text{ ppm} . \quad (34)$$

3.2.2 Kohlendioxid CO₂

Ist das Endprodukt der Verbrennung von kohlenstoffhaltigem Material. Der MAK-Wert beträgt 9000 mg/m^3 (ca. 4600 ppm). Vor der Industrialisierung war der CO₂-Gehalt der Atmosphäre bei ca. 250 ppm, zur Zeit beträgt er ungefähr 350 ppm. Die Produktion von CO₂ geschieht z. B. auch beim Atmungsvorgang oder bei der biologischen Zersetzung von organischem Material.

3.2.3 Stickstoffoxide

Die Gase Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) werden unter dem Begriff NO_x (Stickoxide) zusammengefasst.

Bei allen Verbrennungsvorgängen entstehen Stickoxide (NO_x) als Verbindung zwischen dem Stickstoff der Luft und dem Sauerstoff, aber auch durch Oxidation von stickstoffhaltigen Verbindungen, die im Brennstoff enthalten sind. Insgesamt sind neun Stickoxide bekannt, drei der Formel NO_x (x=1,2,3) und sechs der Formel N₂O_x (x=1,2,3,4,5,6).

Stickstoffoxid (NO₂) ist ein rotbraunes, unangenehm riechendes Gas, das die Schleimhäute stark angreift. Es fällt als Zwischenprodukt bei der Salpetersäure-Herstellung an. Stickstoffmonoxid (NO) ist ein farbloses Gas, das an Luft sofort zu NO₂ oxidiert wird. Je höher die Verbrennungstemperatur ist, desto höher ist die Stickstoffoxidbildung.

Der Kurzzeitgrenzwert für NO₂ beträgt nach TA Luft $200 \text{ } \mu\text{g}$ pro m³ Atemluft (Immissionsgrenzwerte). Wenn der Tagesmittelwert der NO_x-Konzentrationen über $150 \text{ } \mu\text{g}$ pro m³ Atemluft liegt, treten akute Erkrankungen der Atemorgane auf. Stickstoffdioxid ist ein starkes Reizgas und wirkt auf Schleimhäute, Atemwege und beeinträchtigt die Lungenfunktion.

Die Hauptemittenten von NO_x (NO+NO₂) sind KFZ und Kraftwerke. NO₂ greift Schleimhäute und Atemwege an. NO ergibt eine Zellschädigung im Bereich der Lungenbläschen. Treibhausgas und Schädigung der Ozonschicht: N₂O.

IW 1 Wert: 0.08 mg/m^3 (NO₂).

IW 2 Wert: 0.2 mg/m^3 (NO₂).

MIK Wert: 0.2 mg/m^3 (NO₂), 1 mg/m^3 (NO), (Halbstw.).

MAK Wert: 9 mg/m^3 (NO₂).

Innenstadt $0.04\text{-}0.1 \text{ mg/m}^3$ (NO_x).

4. Informationen zum FC 1200 System und Fuel Prozessor

4.1 Ballard Nexa 1200 Watt Compact Power Supply System

[7], [8], [17], [18]

In der Brennstoffzellenfabrik von Ballard wurde der erste kommerzielle (massenproduzierte) Stack für PEM-Brennstoffzellensysteme hergestellt.

Das Leistungsmodul hat eine maximale Ausgangsleistung von 1200 Watt unregulierter DC Leistung und benötigt ungefähr 1 m³ Wasserstoff bei Abgabe seiner maximalen Ausgangsleistung. Das primäre Ziel war die Herstellung des Stacks und nicht die Integration von Schnittstellen für verschiedenste Systemanbindungen.

Wird Nexa gestartet, so beginnt das Modul automatisch mit einer Start-up Prozedur. Nach Beendigung dieser wechselt es in den Operations-Modus, indem die volle Leistung des Moduls kontinuierlich abgerufen werden kann. Der PEM Brennstoffzellenstack wird durch ein Druckluftgebläse luftgekühlt solange die Ventile und der Druckminderer die Wasserstoffzufuhr mit der Zufuhr von Brennstoff regulieren, die an die gegebene Last angepasst wird.

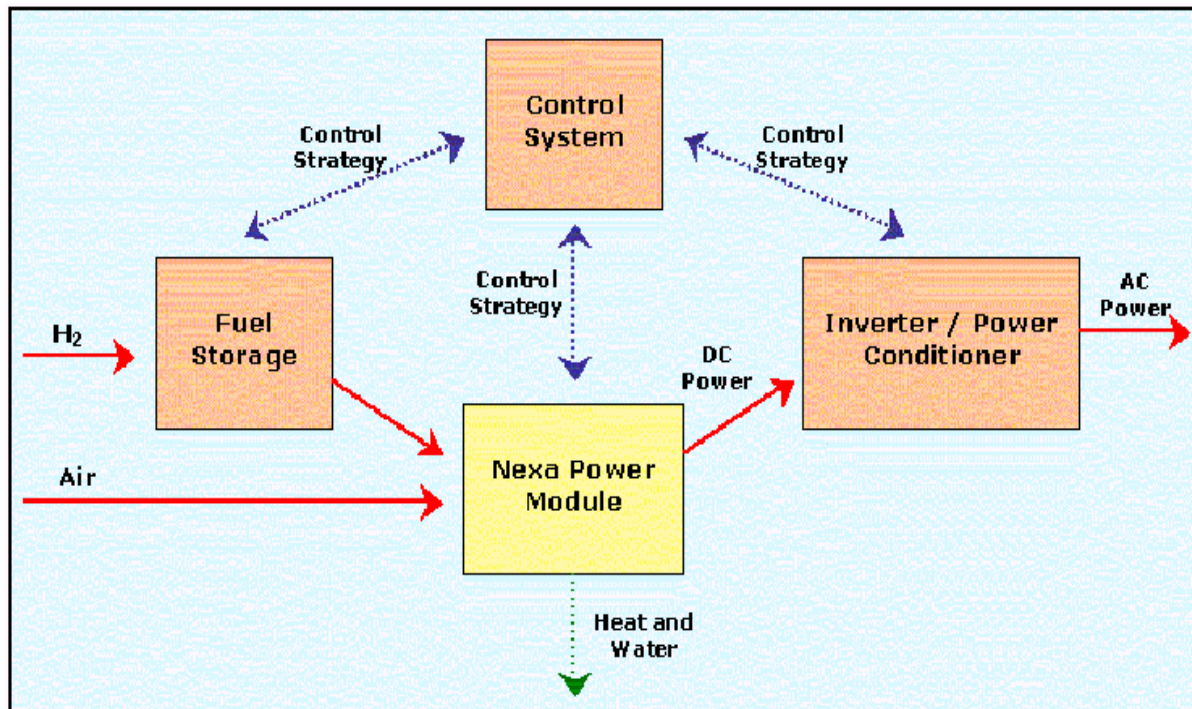


Abbildung 9 Nexa Power Module (Quelle: [17]).

Die Abbildung 9 zeigt wie das Nexa Power Modul zu einer eigenständigen, unabhängigen Energiequelle integriert werden kann. Der Inverter/Power Conditioner (Wechselrichter) muss so für die Anwendung ausgelegt werden, dass das Verhalten des Wasserstoffspeichers (Reservoir), welches von seinem Gewicht und Volumen bestimmt wird, mit der gewünschten Betriebszeit übereinstimmt. Die momentane Wasserstoffspeichertechnologie ermöglicht es bereits eine akzeptable Energiedichte für die meisten Anwendungen bereitzustellen. Zukünftige Entwicklungen gehen in Richtung leicht komprimierte Wasserstofftanks und Niedertemperaturmetallhydriden. Dadurch kann dann die Energiedichte für zusätzliche Leistungsanforderungen gesteigert werden.

Typisch wie für alle Brennstoffzellen wird Wasser und Wärme produziert, sie sind die einzigen Nebenprodukte. Das Nexa Modul ist für den Einsatz im Inneren von Gebäuden als auch außerhalb geeignet. Die leisen Betriebsgeräusche und die kompakten Abmessungen eignen

es für zahllose Anwendungen, von Notstromaggregaten bis zu tragbaren Endverbrauchergeräten. Im Gegensatz zu Batterien wird die Grenze vor allem durch die Verfügbarkeit des Brennstoffes (Fuel) bestimmt.

In Tabelle 4 werden technische Angaben zum Nexa Power Modul gemacht.

Performance	Rated net output	1200 W
	Current	46 Amps
	DC Voltage	26 Volts
	Operating lifetime	1500 hours
Fuel	Composition	99.99% dry gaseous hydrogen
	Supply pressure	0.7 - 17 bar
	Consumption	< 18.5 l _N /min
Operating Environment	Ambient temperature	3°C 30°C
	Relative humidity	0% to 95%
	Location	Inside and outside
Physical	Length x width x height	56 x 25 x 33 cm ³
	Weight	13 kg
Emissions	Liquid water	Maximum 0.87 l/h ²
	Noise	<72 dBA @ 1 m

Tabelle 4 Technische Angaben von Ballard zum Nexa Power Modul (Quelle: [17]).



Abbildung 10 Ballard Fuel Cell Power Module Nexa 1200 Watt (Quelle: [18]).

Specifications

Performance :	Rated net output	1200 watts ¹
	Current	46 Amps ²
	DC voltage	26 Volts ²
	Operating lifetime	1500 hours
Fuel :	Composition	99.99% dry gaseous hydrogen
	Supply pressure	10 to 250 PSIG
	Consumption	≤ 18.5 SLPM ²
Operating Environment :	Ambient temperature	3°C to 30°C (37°F to 86°F)
	Relative humidity	0% to 95% ³
	Location	Indoors and outdoors ⁴
Physical :	Length x width x height	56 x 25 x 33 cm (22 x 10 x 13 in)
	Weight	13 kg (29 lbs)
Certification :		CSA, UL
Emissions :	Liquid water	0.87 liters (30 fluid oz.) maximum per hour ²
	Noise	≤ 72 dBA @ 1 meter
Integration :	Fuel interface	45° flared tube fitting for 1/4" OD tubing – metallic
	Electrical interface	#8 AWG electrical wire
	Control interface	Full duplex RS 485

¹ Beginning of life, sea level, rated temperature range.

² At rated net output.

³ Non-condensing.

⁴ Unit must be protected from inclement weather, sand and dust.

Tabelle 5 Spezifikationen und Beschreibungen in dieser Abbildung stimmen mit dem Datum der Publikation überein (03/02) (Quelle: [18]).

In Abbildung 10 sieht man das Nexa Power Module 1200 Watt und in Tabelle 5 werden weitere Details dazu angegeben.

4.2 Fuel Prozessor (IdaTech)

[19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]

Fuel Prozessoren werden in der Zukunft ein wesentlicher Bestandteil von Niedertemperatur-Brennstoffzellen, PEMFC und AFC inkludiert, sein.

Neben der partiellen Oxidation und der autothermen Reformierung wird die Dampfreformierung von IdaTech bevorzugt (siehe dazu Tabelle 6).

Type	Process	Typical Hydrogen Purity
IdaTech Fuel Processor	Steam Reforming	99.95%; <1 ppm CO and <5 ppm CO ₂
ATR	Partial Oxidation Coupled With Steam Reforming	50-60%; 10-100 ppm CO and 20-30% CO ₂
POX	Partial Oxidation	40-50%; 10-100 ppm CO and 20-30% CO ₂

Tabelle 6 Ein Vergleich der wichtigsten Reformtechnologien im Vergleich mit dem Fuel Prozessor von IdaTech (Quelle: [19]).

Oft wird der Begriff Reformer mit dem des Fuel Prozessor verwechselt, daher hier eine klare Definition:

Reformer: Ein Gerät, welche verschmutzten Wasserstoffdampf bei einem chemischen Prozess produziert, wobei Alkohol und/oder Kohlenwasserstoffe als Ausgangsbrennstoffe verwendet werden. Als Beispiel sei ein autothermer Reformer ohne ergänzenden Wasserstoffreiniger genannt, derselbe wie ihn Derby¹³ beschreibt.

Fuel Prozessor: Ein Gerät, welches reinen Wasserstoffdampf produziert, gekoppelt mit einem Wasserstoffreiniger (oder mehrfache Reinigungsstufen) nach einem Reformer. Ein Beispiel dafür wäre der IdaTech Fuel Processor.

Reformate: Das rohe, wasserstoffreiche Gas, produziert durch einen Reformer, beinhaltet einen Dampfreformer und einen autothermen Reformer.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Definition des Wirkungsgrades von einem Fuel Prozessor. Folgende Definition wird für den Vergleich verschiedener Fuel Prozessoren verwendet:

$$Efficiency = \frac{LHV_{H_2} (consumed - by - fuel - cell)}{HHV(feedstock) + HHV(fuel)} \quad (35)$$

Wobei LHV der untere Heizwert und HHV der obere Heizwert ist. Es ist wichtig anzumerken das nicht der gesamte Wasserstoff, der vom Reformer oder Fuel Prozessor produziert wird von der Brennstoffzelle selbst konsumiert wird um damit Elektrizität zu liefern sondern das damit etwaige Verluste des Systems ausgeglichen werden. Vertrauen kann man nur der Menge Wasserstoff, die gewöhnlicherweise von der Brennstoffzelle konsumiert wird. Der gesamte Ausgangsbrennstoff als auch Brennstoff der vom Fuel Prozessor oder Reformer verbraucht wird muss aufsummiert werden um eine sachliche Repräsentation des Wirkungsgrades zu erhalten.

Obwohl sich die Definition des Wirkungsgrades nicht auf die reversible Arbeit stützt, ist es vielleicht die am gebräuchlichsten und akzeptierteste Form vom wirtschaftlichen Aspekt eines Fuel Prozessors. Darüber hinaus ist dieser Ausdruck für den Wirkungsgrad ein metrischer für den Vergleich der Leistungsfähigkeit des Fuel Prozessors in Bezug auf seine theoretischen Grenzen. IdaTech hat einen neuen Typ von Fuel Prozessor entwickelt und patentiert, jedoch nicht wie jede andere beliebige Konkurrenztechnologie sondern mit den folgenden zusätzlichen Vorteilen:

1. Wasserstoff als hochreines Produkt ohne zusätzliche Reinigungsmaßnahmen,
2. großer Wirkungsgrad,
3. kompakte Abmessungen und
4. vorhandenes Potential für Kosteneinsparung bei Serienfertigung.

¹³ [39] R. Derby: "Unleashing fuel cells`Holy Grail", Fuel Cells Bulletin 3 (December 1998) 6-8.

Dieser Fuel Prozessor hat sich schon bei unterschiedlichen Ausgangsbrennstoffen wie Methanol, Ethanol, Methan, Propan, K1 Kerosin, Diesel und Biodiesel bewährt. Diese Vorteile konnten durch die folgenden drei Funktionen erreicht werden:

- Dampf Reformer,
- Wärmeerzeugung und
- Wasserstoffreinigung.

Dies ist in einem einzigen Gerät integriert (siehe Abbildung 11).

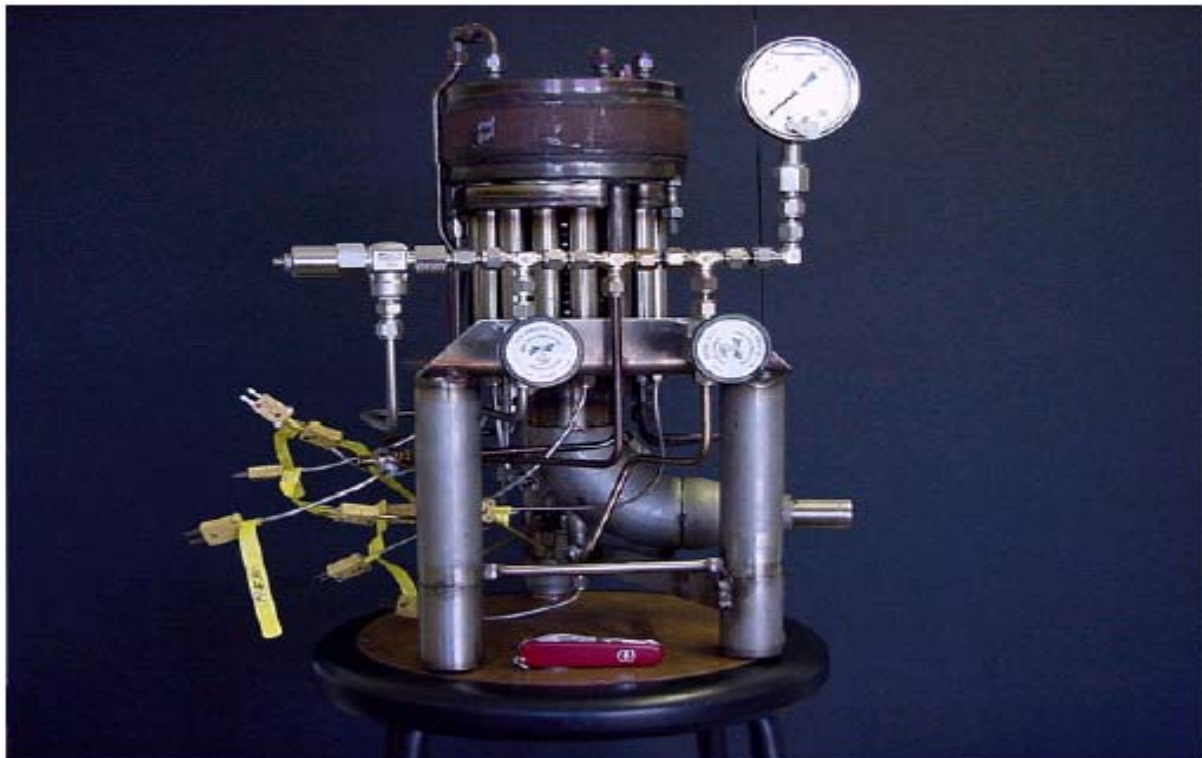


Abbildung 11 Fuel Prozessor (IdaTech), der Wasserstoffreiniger ist vollständig integriert (mechanisch und thermisch) mit dem Wasserstoffproduzierendem Teil (Quelle: [28]).

4.2.1 Wasserstoffreiniger

Der Wasserstoffreiniger besteht aus zwei Stufen: aus einer Wasserstoff selektiven Membran, die als erste Stufe benützt wird und die die Mengenseparation des Wasserstoffes von dem rohen Reformergasgemisch vornimmt, währenddessen ein katalytisch aufpolierender Schritt als zweite Stufe verwendet wird, um die CO- und CO₂-Werte Schrittweise abzubauen. Die Wasserstoff selektive Membran ist das Resultat einer Palladium Metalllegierung. Das Membran Modul beinhaltet die erste Stufe von dieser Reinigungsanlage mit dieser hohen Empfindlichkeit (typisch 600 bis 1000) für Wasserstoff, die über allen anderen Gasen liegt. Die zweite Stufe ist das üblicherweise verwendete katalytische Methanolbett. Die erste und die zweite Stufe von dieser Wasserstoffreinigungsanlage sind thermisch integriert mit dem Dampf-reformer des Fuel Prozessors.

Der Abscheidungsprozess liefert natürlich einen entsprechenden Anteil von Dampf als Ausbeute. In diesem Fall der Abfalldampf von der ersten Stufe des Wasserstoffreinigers, der noch einen Brennstoffgehalt besitzt und dieser wird daher durch die Konstruktion bedingt, für das Wärmemanagement des Fuel Prozessors verwendet (verbrannt). Diese Eigenschaft führt zum Erreichen des theoretischen Wirkungsgrades des Fuel Prozessors, der dadurch für

seine kompakten Abmessungen und den damit bedingten geringeren Kosten des Wasserstoffreinigers eine ausgezeichnete technische Entwicklung darstellt.

Da eher im Allgemeinen als im Speziellen die Separationsmethode für die erste Stufe des Reinigers verwendet wird, ist das resultierende Produkt im wesentlichen frei von allen fremden Bestandteilen die sich nachteilig auf die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle auswirken. Als Beispiel sind jene gemeint welche die Anodenreaktion in der Brennstoffzelle vergiften, Amine und organische Stickstoffverbindungen die aber gewissermaßen in der ersten Stufe des Wasserstoffreinigers abgesondert werden. Als Gegensatz die konventionellen Methoden die für die Hoch- und Niedertemperatur Shift-Reaktoren Verwendung finden, wobei einzig ein empfindliches Oxidationsmittel eingesetzt wird um die Konzentration des Kohlenmonoxids im Produkt Wasserstoffdampf zu reduzieren¹⁴.

Diese Methode des Wasserstoffreinigers liefert ein sehr hochreines Produkt Wasserstoff das analysiert typischerweise eine Reinheit von >99.9 % hat mit einem CO-Gehalt von <1 ppm und einem CO₂-Gehalt von <5 ppm. Außerdem ist die Reinheit des Produktes Wasserstoffs unabhängig vom Ausgangsbrennstoff der vom Fuel Prozessor konsumiert wird (siehe Tabelle 7, wobei die Grenzen der Empfindlichkeit für alle anderen Gase als Wasserstoff bei 1 ppm liegen, den Wasserstoff erhält man durch die Differenz).

Feedstock	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppm)	H ₂ (vol %)	H ₂ Production
Methanol	0	0.66	459	99.95	29-31 sLm
Methane	0	0.80	279	99.97	40 sLm

Tabelle 7 Analyse des Produktes Wasserstoff vom Fuel Prozessor von IdaTech, der mit Methanol und Methan betrieben wird (Quelle: [19]).

Es gibt mehrere Vorteile für die Verwendung eines Fuel Prozessors welcher hochreinen Wasserstoff in einem Niedertemperatur-Brennstoffzellensystem produziert.

1. Die hohe Ausnutzung des Wasserstoffes (>96 % und öfters sogar >98 %) durch die Brennstoffzelle. Dies bedeutet das der Ausgangsbrennstoff äußerst ökonomisch, also mit niedrigen Betriebskosten und geringen Auswirkungen auf die Umwelt, eingesetzt wird.
2. Größte mögliche Leistungsfähigkeit vom Brennstoffzellenstack. Für vier unterschiedliche Hersteller von PEMFC-Stacks ist es möglich, den Wasserstoff, der von diesem Fuel Prozessor (IdaTech) produziert wird, zu verwenden, ohne Ausnahmen in irgendeiner Form machen zu müssen da die Polarisationskurven mit den Polarisationskurven des normal verwendeten komprimierten Wasserstoffes übereinstimmen.
3. Gleichberechtigt kompatibel mit PEMFC und AFC Stacks. Die hohe Reinheit des Produktes Wasserstoff und die extrem niedrige Konzentration von Kohlendioxid (typische Analysewerte <5 ppm) machen es möglich, diesen entwickelten Fuel Prozessor auch für AFC-Anwendungen einzusetzen.

¹⁴ [40] S. Ahmed, R. Kumar, and M. Krumpleit: "Fuel processing for fuel cell power systems", Fuel Cells Bulletin 12 (September 1999) 4-7.

4.2.2 Dampfreformer

Der Fuel Prozessor von IdaTech produziert Wasserstoff, der auf einer breiten Auswahl von Ausgangsbrennstoffen basieren kann aufgrund des Dampfreformers. Die Geschichte des Dampfreformers basiert auf die Jahrzehnte alte Arbeitsweise der Benzin-Chemie und der Benzinraffinerien (Industrie). Wasserdampfreformer verwenden heißen Dampf als Oxidationsmittel, welches sich besser eignet als der Sauerstoff von der Luft (siehe partielle Oxidation und autotherme Reformation). Die Vorteile sind das der Stickstoff von der Luft nicht das Produkt Wasserstoff mindert, und ab ungefähr 30 % des produzierten Wasserstoffes wird Wasserstoff vom Dampf abgeleitet, dabei wird die Wirtschaftlichkeit des Ausgangsbrennstoffes gesteigert.

Dampfreformer wurden eine sehr lange Zeit für die unterschiedlichsten Ausgangsbrennstoffe eingesetzt, von Naturgas bis zu Schweröl. Eigentlich wurde die Dampfreformierung von Bronzekohle und Kohle kommerziell betrieben. Gewöhnungsbedürftig wurden die Brennstoffzellensysteme schrittweise von Ausgangsleistungen im Wattbereich allmählich auf Kilowatt gesteigert, dabei konnte auch umgekehrt mit dem Leistungsanstieg die Einheiten für die Dampfreformierung verkleinert werden. Dieses Ziel konnte erfolgreich erreicht werden und die verwendeten Ausgangsbrennstoffe rangieren jetzt von Methanol über Diesel, Biodiesel bis zu Alkohol, mit denen jetzt hochreiner Wasserstoff produziert werden kann.

Um den notwendigen Druckunterschied für den Betrieb des Wasserstoffreinigers zu bekommen, wird die Dampfreformation so ausgeführt das der Druck von ungefähr 100 psig¹⁵ (6.9 bar) auf 200 psig (13.8 bar) erhöht wird. Für flüssige Ausgangsbrennstoffe werden diese Drücke bereits bei Verwendung diverser Flüssigkeitspumpen aufgebaut. Im Fall von Naturgas und Propan wird ein kleiner Kompressor verwendet um den Fuel Prozessor mit den Kohlenwasserstoffen, die im Ausgangsbrennstoff enthalten sind, mit dem benötigten erhöhten Druck zu versorgen.

Standard Katalysatoren basieren auf kommerziell gestützten Nickel-Rezepturen welche für das Dampfreformieren von Kohlenwasserstoffen, die als Ausgangsbrennstoffe eingesetzt werden, verwendet werden. Diese Katalysatoren sind sehr anfällig für Vergiftungen durch Schwefelpräparate, daher ist es notwendig den Schwefel von den Ausgangsbrennstoffen zu entfernen, von jenen also die organische Schwefel-Substanzen enthalten. Werden Katalysatoren, die Schwefel tolerieren, verfügbar, so wird es nicht mehr notwendig sein eine Entschwefelung der Ausgangsbrennstoffe vor dem eigentlichen Reformprozess oder bei der Nachreformierung durchzuführen, den seitdem das Wasserstoffreinigungsmodul verwendet wird werden alle Absonderungen von fremden Bestandteilen effektiv durch das verwenden der Eigenschaften der Palladium-Metalllegierung der Membran durchgeführt und somit kann die Vergiftung von Schwefel nicht mehr stattfinden.

4.2.3 Wirkungsgrad

Der Fuel Prozessor soll einen hohen Wirkungsgrad erzielen. Jegliche Wärmeverluste des Prozessors machen sich in seinem Wirkungsgrad bemerkbar. Obwohl die Abgase von dem Dampfreformierungsprozess als Brennstoffe (bzw. -gase) für die Wärmeerzeugung und der damit verbunden Dampferzeugung dienen, ist der Gesamtwirkungsgrad sehr nahe bei seiner theoretischen Grenze. In Tabelle 8 werden die gemessenen Wirkungsgrade mit den theoretischen verglichen unter Verwendung von unterschiedlichen Ausgangsbrennstoffen.

¹⁵ 1 psi = 6.89476 kPa, 1 bar = psi/14.5, 100 psi = 6.896 bar, 200 psi = 13.793 bar.

Feedstock	Experimental Efficiency	Theoretical Efficiency
Methanol	86-90%	87%
Methane	67%	66%
Biodiesel	55%	61%
Diesel	70%	66%

Tabelle 8 Wirkungsgrade des Fuel Prozessors von IdaTech bei Verwendung von unterschiedlichen Ausgangsbrennstoffen (Quelle: [19]).

Die Daten in der Tabelle 8 zeigen noch einen kleinen Spielraum für Verbesserungen des Wirkungsgrades, obwohl die Isolation und die Wärmeverluste bereits optimiert wurden. Der theoretische Wirkungsgrad ist unter Zugrundelegung folgender Annahmen berechnet worden:

Das Kohlenstoffverhältnis wird als konstant mit 1:1 für Methanol und 3:1 für alle anderen Kohlenwasserstoffe in den Ausgangsbrennstoffen angenommen. Dieses Verhältnis differiert während der physikalischen Messungen. Dies ist auch der Grund für die Abweichung der theoretischen von den praktischen Werten. Der theoretische Wirkungsgrad basiert auf angenommenen idealen Stöchiometrischen Reaktionen, welche aber in der Praxis nicht verwirklicht werden können, daher sind sie eine weitere Quelle für die Abweichungen.

4.2.4 Potential für weitere Anwendungen

Der IdaTech Fuel Prozessor ist das Resultat einer 15-Mann-Jahre dauernden Anstrengung mit einer Investition von USD 1 000 000 in dessen Entwicklung. Ursprünglich war der Prozessor für die spezialisierte Anwendung in Brennstoffzellensystemen gedacht, um eben die Nachteile der geringen Wasserstoffreinheit, der großen Abmessungen, der Komplexität der Arbeitsweise und die hohen Kosten konventioneller partieller Oxidationssysteme und autothermer Reformierungssysteme zu überwinden. Die Arbeit daran hat zwei unterschiedliche, aber sehr verwandte Versionen von Fuel Prozessoren hervorgebracht, einen für Alkohol und einen anderen für Kohlenwasserstoffe. Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Versionen liegt in den Ausgangsbrennstoffversorgungsmethoden. Die Alkoholversion hat eine einfache Zufuhr für ein Alkohol/Wasser-Gemisch, die andere Version hat zwei Zufuhrmöglichkeiten, eine für Wasser und eine für die Kohlenwasserstoffe.

Obwohl der Prozessor ein großes Potential besitzt für die unterschiedlichsten Anwendungen, ist die Geschäftsstrategie von IdaTech auf die stationäre und tragbaren Anwendungen <10 kW elektrischer Ausgangsleistung für das Netz fokussiert. Der Fuel Prozessor reflektiert diese Geschäftsstrategie. Ein Fuel Prozessor der eingestuft wird um 40 Standard Liter pro Minute Wasserstoff zu liefern ist mit den folgenden Abmessungen von 28 cm Durchmesser und einer Höhe von 46 cm schon sehr kompakt ausgefallen. Diese Maße beinhalten bereits die Isolation, die Dampferzeugungswicklungen, den Zweistufenwasserstoffreiniger und den Dampferzeuger mit dem integrierten internen Brenner. Die Kaltstartzeit beträgt 15 Minuten, dies ist annähernd die gleiche Zeit wie sie ein nach der autothermen Reformierung verwendeter Hoch- und Niedertemperatur Shift-Reaktor ansatzweise für die Wasserstoffreinigung benötigt.

Der parasitären Energiebedarf des Prozessors ist sehr anspruchslos. Für flüssige Ausgangsbrennstoffe wird die benötigte elektrische Energie für das Pumpen der Brennstoffe in den Fuel Prozessor mit <50 Watt angegeben. Gasförmige Ausgangsbrennstoffe (Erdgas und Propan) benötigen eine elektrische Leistung von ungefähr 250 Watt. Die Luft welche für die Verfeuerung im Fuel Prozessor benötigt wird kann durch ein eigenes Gebläse, durch einen Wirbelstrom von der Kathodenluftversorgung oder durch Ausnutzung der Austrittsluft von der Kathode bezogen werden. Die späteren Wegebürden dem System keine weiteren parasitären Leistungen auf. Wird die Verbrennungsluft durch ein eigenes Gebläse bereitgestellt, so beträgt die Leistungsanforderung dafür <200 Watt.

Es wurde kein Versuch unternommen, einen Fuel Prozessor für lastspezifische Anwendungen zu entwerfen, obwohl dies vielleicht in der Zukunft vakant wird, ermöglicht durch die Reduzierung der thermischen Masse vom Prozessor oder durch das Verbessern des Wärmetransportes im Katalysatorbett des Reformers. Viele Anwendungen der Mikroreaktoren zeigen die Machbarkeit für solche Anforderungen.

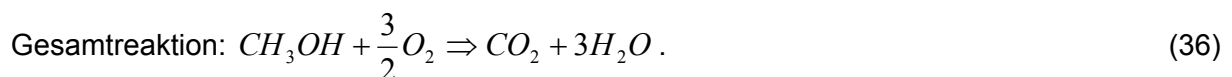
Andere Anwendungen für den Fuel Prozessor beinhalten örtliche Wasserstoffproduktion für Industrieanwendungen, Härten und blankes Veredeln von Metallen, analytische und chemische Labors, Hydratation von Fetten und Ölen. Das Wasserstoffreinigungsmodul kann also unabhängig vom Dampfreformer eingesetzt werden, für Anwendungen wie in der Halbleiter und Mikrochip Produktion, wo eben der Anspruch auf einen ausnahmsweise hochreinen Wasserstoff besteht. Weiters kann das Modul auch zum Reinigen eines auf dem elektrochemischen Weg hergestellten Wasserstoffes verwendet werden.

Das primäre Interesse von IdaTech liegt im kommerziellen Betrieb des Fuel Prozessors, der für alle Typen von Ausgangsbrennstoffen, die für die Brennstoffzellenanwendungen eingesetzt werden, angewendet wird.

Der neueste Prototyp des Fuel Prozessor liefert 13 Standard Liter pro Minute hochreinen Wasserstoff und hat bereits ein Kaltstartverhalten von 3 Minuten bewiesen. Dieses Gerät hat nur mehr einen Durchmesser von 15 cm und eine Höhe von 15 cm und benötigt <20 Watt Leistung. Der Prototyp soll in einem 1 kW PEMFC-Stack als Beispiel für einen kompakten und leisen Stromerzeuger verwendet werden.

5. Methanol-Wassergemisch

5.1 Energieinhalt von Methanol-Wassergemisch



Methanol und Wasser sind flüssig (hier also maximaler Heizwert, d.h. oberer Heizwert).

$$\Delta H_{248, H_2O, gas}^0 = - 241,826 \text{ kJ/mol}, \quad (37)$$

$$\Delta H_{248, H_2O, lq}^0 = - 285,83 \text{ kJ/mol}, \quad (38)$$

Energiewert von 1 mol Teilchen ($1 \text{ mol} = 6.023 \cdot 10^{23}$ Teilchen),

$$\Delta H_{238, CO_2, gas}^0 = - 393,505 \text{ kJ/mol}, \quad (39)$$

$$\Delta H_{238, CH_3OH, lq}^0 = - 238,572 \text{ kJ/mol}, \quad (40)$$

$$\Delta H_{238, O_2, gas}^0 = - 0 \text{ kJ/mol}. \quad (41)$$

(Quelle: Thermochemical Data of Pure Substances; Ihsan Barin [10])

Anmerkung

Die Enthalpiewerte sind auf 238,15 Kelvin = 25 °C bezogen.

Lq...flüssig.

Gas...Stoff gasförmig.

ΔH = Summe der Enthalpie der Reaktionsprodukte – Summe der Enthalpie der Ausgangsstoffe

ΔH = Enthalpie.

Jedem Stoff wird ein Energieinhalt zugeordnet, nach der Reaktion wird auch der Gesamtenergieinhalt bestimmt, die Differenz ist entweder Endotherm oder Exotherm. Exotherm ist die negative Gesamtenergieänderung. Die Energie (Bindungsenergie) die bei der Reaktion frei wird ist Exotherm (vgl. Benzin-Sauerstoff-Gemisch im Verbrennungsmotor). Wenn bei einer Reaktion Energie benötigt wird, so bezeichnet man dies als eine endotherme Reaktion. Die Energie wird meist in Form von Wärme zugeführt.

UHV (Upper Heat Value)

$$\Delta H = 2 \cdot (-285,83) + (-393,505) - (-238,572) = \mathbf{-726,593 \text{ kJ/mol}}, \quad (42)$$

$$\Delta H = -726,593 \text{ kJ/mol}, \quad (43)$$

wird bei der Reaktion freigesetzt.

LHV (Lower Heat Value)

$$\Delta H = 2 \cdot (-241,826) + (-393,505) - (-238,572) = \mathbf{-638,585 \text{ kJ/mol}}, \quad (44)$$

$$\Delta H = -638,585 \text{ kJ/mol}, \quad (45)$$

wird bei der Reaktion freigesetzt.

$$\text{Molmasse von CH}_3\text{OH: } M_{r, \text{CH}_3\text{OH}} = 32,042 \text{ g/mol (Masse von 1 mol Methanol)}, \quad (46)$$

$$1 \text{ kg MeOH} = 31,21 \text{ mol (} 1000\text{g}/32,042\text{g/mol)} = 31,21 \text{ mol}. \quad (47)$$

$$\mathbf{UHV: \text{Energiegehalt von 1 kg MeOH: } 726,593 \cdot 31,21 = 22677 \text{ kJ/kg} = \mathbf{6,3 \text{ kWh/kg}}.} \quad (48)$$

$$\mathbf{LHV: \text{Energiegehalt von 1 kg MeOH: } 638,585 \cdot 31,21 = 19930 \text{ kJ/kg} = \mathbf{5,536 \text{ kWh/kg}}.} \quad (49)$$

$$\mathbf{\text{Reines Methanol: } 5.536 \text{ kWh/kg} \cdot 0.786 \text{ (Dichte Methanol } 25^\circ\text{C)} = \mathbf{4.3512 \text{ kWh/kg}}.} \quad (50)$$

Energiegehalt von 1 kg Brennstoff (1:1 mol, Methanol-Wassergemisch):

UHV:

$$\text{Energieinhalt von 1 kg Brennstoff besteht aus } 640 \text{ g MeOH} + 360 \text{ g H}_2\text{O} = 6.3 \cdot 0.64 = \mathbf{4,03 \text{ kWh/kg}} = 114513 \text{ kJ/kg}. \quad (51)$$

LHV:

$$\text{Energieinhalt von 1 kg Brennstoff besteht aus } 640 \text{ g MeOH} + 360 \text{ g H}_2\text{O} = 5.536 \cdot 0.64 = \mathbf{3.543 \text{ kWh/kg}} = 12754.48 \text{ kJ/kg}. \quad (52)$$

Dichte Brennstoff: 0,88 kg/Liter

Upper Heat Value:

$$0.88\text{kg/Liter} \cdot 4.03\text{kWh/kg} = 3.5464 \text{ kWh/Liter}. \quad (53)$$

$$1 \text{ Liter Brennstoff} = 3,55 \text{ kWh/Liter} = 12771 \text{ kJ/Liter}. \quad (54)$$

Lower Heat Value:

$$0.88\text{kg/Liter} \cdot 3.543\text{kWh/kg} = 3.11784 \text{ kWh/Liter}. \quad (55)$$

$$1 \text{ Liter Brennstoff} = 3,11 \text{ kWh/Liter} = 11224 \text{ kJ/Liter}. \quad (56)$$

Für die Berechnung des Wirkungsgrades wird natürlich *immer* der Lower Heat Value verwendet! Die spezifische Energiedichte des Methanol-Wassergemisches beträgt $w_M = 3117.84 \text{ Wh/Liter}$.

Anmerkung: Umrechnung: kJ in kWh durch kJ/3600, (1h = 3600s).

5.2 Chemische Reaktion

Diese wird nur für die Wasserstoffreaktion angeschrieben, der Brenner selbst wird nicht berücksichtigt da dieser ja auch ein Elektroofen sein könnte.

Fuel Prozessor: $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$ (liefert H_2).

Wasserstoffbilanz für ein Zellelement und auf 1 mol H_2 bezogen: $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$, (57)

da aber bereits 3H_2 Moleküle vorhanden sind: $3\text{H}_2 + \frac{3}{2}\text{O}_2 \Rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$. (58)

Die Gesamtreaktion kann nun folgendermaßen angeschrieben werden:

$\text{CH}_3\text{OH} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$. (59)

Die Edukte sind $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ und $\frac{3}{2}\text{O}_2$. (60)

Die Reaktionsprodukte sind CO_2 und $3\text{H}_2\text{O}$. (61)

Berechneter Energieinhalt in 1 kg Brennstoff LHV: 3.543 kWh (12752 kJ), (62)

1 Liter Brennstoff (LHV) = 3.11784 kWh (11224 kJ). (63)

6. Messprogramm

Folgende Punkte wurden näher untersucht:

- Messung von Strömen und Spannungen.
- Analyse von dynamischen Ereignissen im Inselbetrieb (Start-ups, Turn-offs, Voltage-interruptions, Load-changes, etc.).
- Synchroner Netzbetrieb (Theoretische Behandlung).
- Modell zur Nachbildung des Systems (stationär, dynamisch, Verbrauch).
- Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Lasten bestimmen.
- Analyse des Stack-Verhaltens (Strom- und Spannungsmessung, Zeitverhalten).
- Online-Messungen von Emissionen (Zusammensetzung der Abgase) bei unterschiedlichen Lasten sowie bei dynamischen Laständerungen (Start-ups, Shut-downs, Load-changes, etc.).
- Degradation verschiedener Komponenten des Systems (Stack, Batterie, ...) in Bezug auf die Gesamtbetriebsstundenanzahl des Systems.
- Betriebsverhalten,
- Wartungsaufwand,
- Bedienungskomfort,

- Bedürfnisse der Anwender und
- Erkennen des Einsatzgebietes des Systems.

7. Messungen an einem PEMFC-System

7.1 Beschreibung des FC 1200 Systems

7.1.1 Fuel Prozessor

In Abbildung 12 und Abbildung 13 werden das Gesamtsystem und die Haupteinzelkomponenten des Methanolbrennstoffzellensystems dargestellt.



Abbildung 12 Gesamtsystem aus Vogelperspektive (li.) und von Seite (re.).

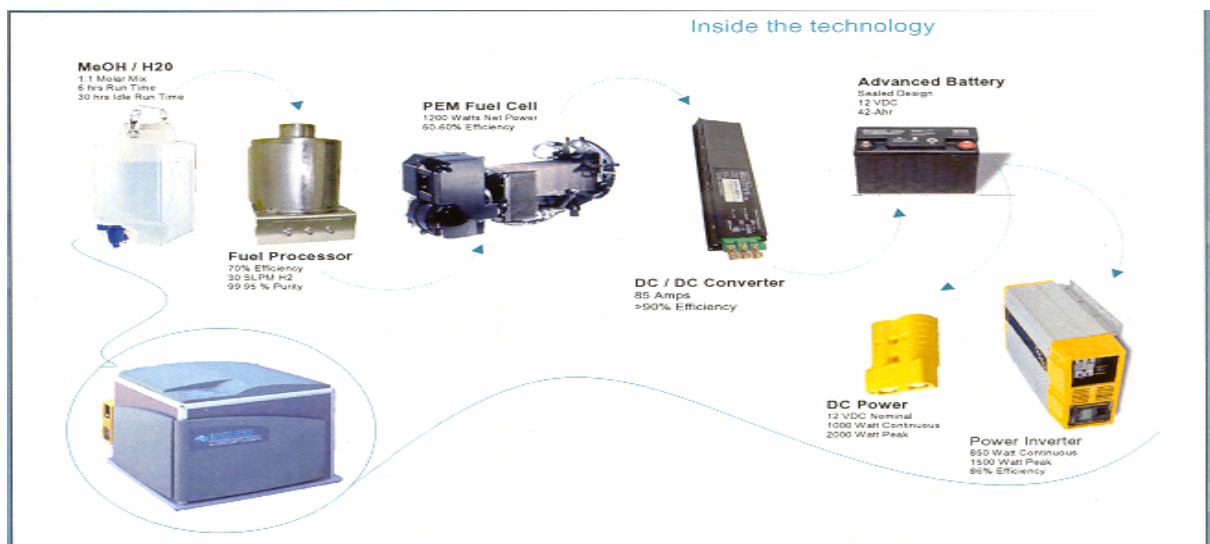


Abbildung 13 Einzelkomponenten des Fuel Cell 1200 Systems von IdaTech.

Bei diesem Methanolbrennstoffzellensystem wird das Methanol mit deionisiertem Wasser im Verhältnis von 1:1 mol (63.5/36.5% Gewichtsprozent) gemischt und in den Tank gefüllt (Fuel Processor, von der Fa. IdaTech entwickelt und gebaut; Abbildung 14).

Der Brenner bezieht seinen Brennstoff in der Startphase direkt vom Tank.

Der Ausgangsbrennstoff kommt in einen Verdampfer und Dampfreformer. Dort, im Betrieb, durch das Aufspalten des Methanolgemisches in Wasserstoff, Kohlenmonoxyd, Kohlendioxyd und Wasser, abhängig von den Thermodynamischen Verhältnissen, entstehen Gase die mit der Umgebungsluft vermischt und verbrennt werden.

In einem Gebiet mit höherem Druckgefälle und einem mit geringerem Druckgefälle wird reiner Wasserstoff an einer Palladiumkupfermembrane abgeschieden. Dieser reine Wasserstoff, welcher gasförmig ist, wird dann in die Brennstoffzellen weitertransportiert.

Da die Zellen Kohlenmonoxid nicht weiterverarbeiten können wird dieses mit den restlichen Abgasen im Brenner verfeuert. Die Gase haben einen Anteil von <3 ppm CO. Die Verbrennungsabgase werden über einen Ventilator abgeführt.

Nach dem zweistufigen Wasserstoffreiniger steht das hochreine Produkt Wasserstoff mit einem Reinheitsgehalt von 99.95% zur Verfügung.

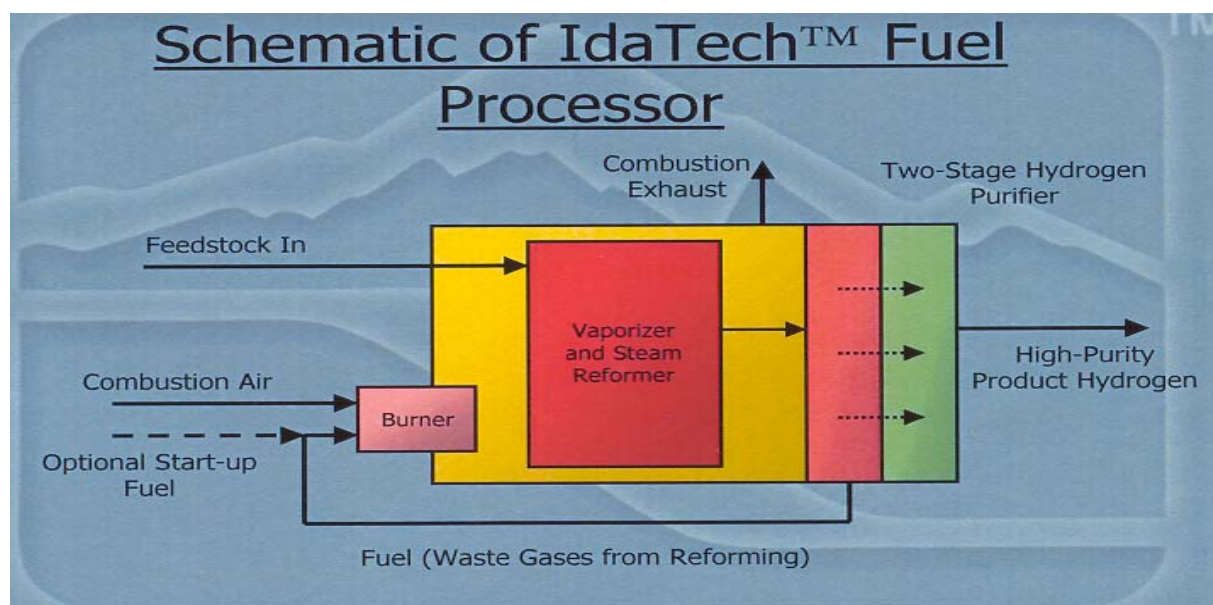


Abbildung 14 Schema des Wasserstoffaufbereitungsprozesses.

7.1.2 Fuel Cell

Der Brennstoffzellenstapel wird von der Fa. Ballard entwickelt und hergestellt. Der Stack liefert eine maximale Leistung von 1200 Watt bei einer variablen Gleichspannung, die abhängig von der jeweiligen Belastung zwischen 26 und 50 Volt DC variiert mit einem Strom von 24 bis zu 46 Amper DC.

7.1.3 DC/DC-Konverter

Um die Stack-Ausgangsspannung zu stabilisieren wird ein Gleichspannungswandler (Step-Down-Converter) verwendet. Am Ausgang werden konstante 14 VDC bereitgestellt.

7.1.4 Batterie

Die Batterie besitzt eine Kapazität von 42 Ah. Im aufgeladenen Zustand kann eine Spannung von 12.85 Volt gemessen werden. [9]

7.1.5 Wechselrichter

Der Wechselrichter ist vom Typ PROsine 1000i von der Fa. Statpower und ist nur für den Inselbetrieb verwendbar. Die Ausgangsleistung bei Dauerbetrieb beträgt 1000 Watt bei einer Spannung von 230 Volt AC RMS. Eine Stoßennleistung für 5 Sekunden wird mit 1500 Watt angegeben. Schutzvorrichtungen: automatischer Überlastschutz, autom. Abschaltung bei Kurzschluss, Überhitzung, Überspannung, Unterspannung, Polumkehr (Sicherung), Wechselstromrückspeisung. [47]

7.1.6 Abluft

Die Durchflussmenge beträgt 4248 Liter/min, die Abgastemperatur im Betrieb erreicht eine maximale Temperatur von 60°C. Vom Hersteller werden keine Angaben über die Zusammensetzung der Abgase angegeben.

7.1.7 Kraftstoffversorgung

Das Volumen des Tanks fasst acht Liter Methanol-Wassergemisch.

7.2 Messsystem

7.2.1 Eigene Messungen

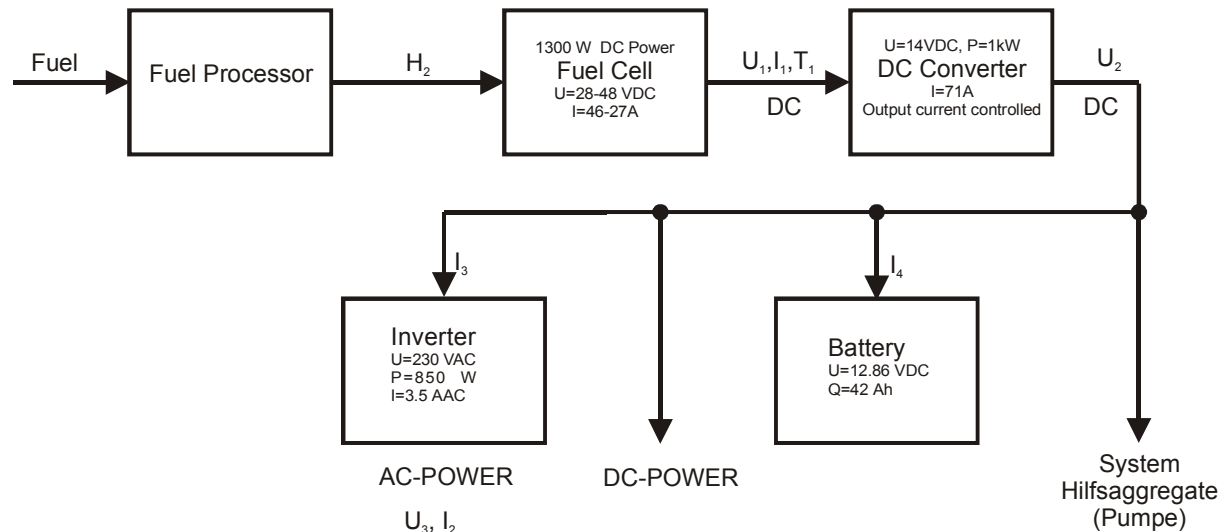


Abbildung 15 Blockschaltbild FCS 1200 System.

In Abbildung 15 wird ein Überblick über das Brennstoffzellensystem mit den aufgenommenen Messgrößen in Form eines Blockschaltbildes gegeben.

Es werden folgende **elektrische Größen** erfasst: **Spannung** direkt und **Strom** über Stromzangen, Schein- und Wirkleistung werden im Programm LabView berechnet. **Nichtelektrische Größen** sind **Temperatur** und **Emissionen**. Ein Überblick über die Messgrößen wird in Tabelle 9 gegeben.

Messgrößen	Bezeichnung	Erfassung	Messbereich	Messeinschub
Ausgangsspannung Brennstoffzelle	U_1	direkt	40 V	DAQN-DMM
Ausgangsspannung Gleichspannungswandler	U_2	direkt	40 V	DAQN-DMM
Ausgangsspannung Wechselrichter	U_3	direkt	400 V	DAQN-DMM
Strom am Ausgang vom Stack	I_1	Zange	0.1 V	DAQN-V
Strom am Ausgang des Wechselrichters	I_2	Zange	0.1 V	DAQN-V
Strom am Eingang des Wechselrichters	I_3	Zange	mV	Voltmeter
Batteriestrom	I_4	Zange	0.01 V	DAQN-V
Temperatur im Stackbereich	T_1	Sensor	-30°C bis 170°C	DAQN-THERM-1
Temperatur am Gebläseausgang	T_2	Sensor	-30°C bis 170°C	DAQN-THERM-1
Emissionen	CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ /N ₂	direkt	Vol.% bzw. ppm	Advance Optima
Brennstoffverbrauch	Q_{Methanol}	visuell	0-8 Liter	Tank

Tabelle 9 Übersicht über die aufgenommenen Messgrößen.

7.2.2 Testaufbau

In der Abbildung 16 wird die Schaltung der Last vor Ort schematisch dargestellt. Als Last wird ein Widerstand von 132 Ω mit einem maximalen Strom von $I_{\text{max}} = 3.2 \text{ A}$ als auch eine Glühlampenkette (9x100 Watt) verwendet. Ein zusätzlicher Widerstand, über eine Zeitschaltuhr am Ausgang angeschlossen, dient für die Untersuchung des zeitlichen Verhaltens des Systems. Als Messgerät wird ein Wattmeter (MetraHit 29 S) und ein dazugehöriger Messstecker für den Strompfad verwendet.

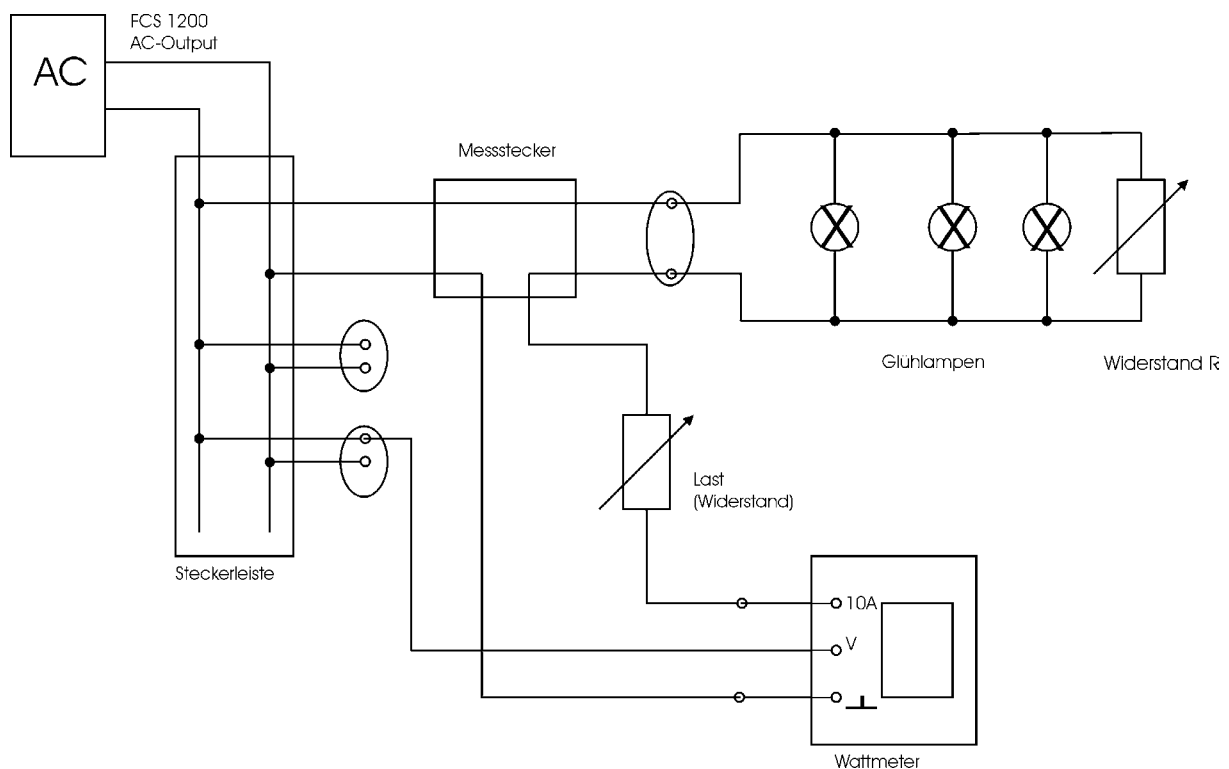


Abbildung 16 Schaltung der Last vor Ort.

7.2.3 Systemmessung

Die Fa. IdaTech stellt einen Data-Logger (Data Viewer 1.1, Abbildung 17) zur Verfügung. Dieser dient als Informationsschnittstelle für die Überwachung und den Betrieb des Brennstoffzellensystems. Die gemessenen Daten werden in einem Daten-File abgespeichert, gleichzeitig die Messwerte und Fehler im Programm angeführt.

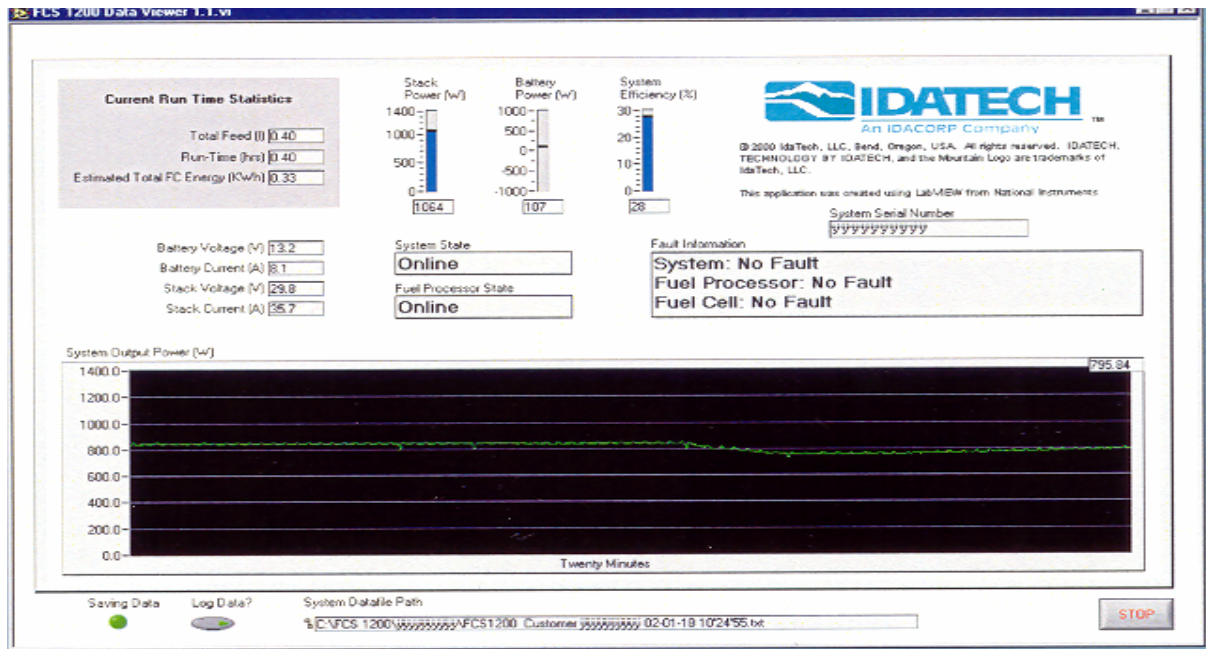


Abbildung 17 Als Informationsschnittstelle für das FC 1200 System dient der Data Viewer 1.1 von der Fa. IdaTech.

Folgende Größen vom System werden angegeben:

- Batteriespannung, -strom,
- Stackspannung, -strom,
- Systemwirkungsgrad,
- System Output Power,
- Total Feed,
- Run Time,
- Estimated Total FC Energy (kWh),
- Brennstoff Consumption,
- System State,
- Fuel Processor State und
- Zeitlicher Verlauf von System Outputpower, Brennstoff Konsum und Batteriespannung.

7.2.4 Verbrauch des Methanol-Wassergemisches

Eine Durchflussmengenmessung ist sehr schwierig, da am Markt Geräte erst ab einer Durchflussgeschwindigkeit von 13-15 ml/min¹⁶ angeboten werden und diese dann auch entsprechend teuer sind. Es wurde eine Messung des Brennstoffkonsums (Verbrauch des Methanol-Wassergemisches) durchgeführt, wobei der Tank auf eine Präzisionswaage gestellt und der Ausgang des Wechselrichters vom Brennstoffzellensystem mit einer konstanten Last beaufschlagt wurde. Diese Messungen hatten ein Intervall von ungefähr 20 Minuten, wobei ein

¹⁶ Milliliter pro Minute

Leistungsspektrum von 200 bis 600 Watt in jeweils 100 Watt-Schritten, abgedeckt wurde. Dabei wurde jede Minute der Gewichtswert des Tanks mitnotiert. Anschließend wurde die Differenz zwischen berechneten und gemessenen Werten verglichen. Dies sollte als Information für die Genauigkeit der Total Feed Anzeige im Data-Viewer 1.1 dienen. Durch den Vergleich konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Data-Viewer 1.1 nicht exakt jeden Messwert aufzeichnet sondern z.B. bei 200 Watt von 1620 Werten nur 1460 Werte notiert. Es fehlen also 160 Werte, dies entspräche einem absoluten Fehler von 9.87%. Deshalb wurde der Tank mit einem 0.5 Liter Maß ausgelitert und dementsprechend skaliert. Für die Messungen wird nun die Arbeit mit Hilfe des verbrauchten Brennstoffs in der betreffenden Zeit berechnet.

7.2.5 Analoge Größen

Wie bereits erwähnt werden die Spannungen U1, U2 und U3 direkt und die Ströme I1, I2, I4 und I5 indirekt über Stromzangen, wobei das Übersetzungsverhältnis entsprechend berücksichtigt wird, erfasst (Abbildung 15) und an den Messverstärker weitergegeben. Der Messverstärker ist von der Firma Dewetron, besitzt acht Eingangskanäle und ist vom Typ Signal Conditioning Rack 8. An den Kanälen 0 bis 2 werden die Ströme eingelesen, an den Kanälen 3 bis 5 die Spannungen und an den Kanälen 6 und 7 wurden die DAQN-DMM Einschubmodule durch Thermoelementmodule vom Typ DAQN-THERM -30° bis 170° ersetzt. Über eine AD-Karte von der Fa. National Instruments werden die Datensignale in das Mess- und Berechnungsprogramm MessungDewetron32 eingelesen. Die Entwicklungsumgebung für MessungDewetron32 wird vom Programm LabView zur Verfügung gestellt.

7.2.6 Messprogramm MessungDewetron32

[42]

Im Folgenden soll anhand eines Flussdiagramms (Abbildung 18), die Weiterverarbeitung der Messdaten im Programm LabView genauer erläutert werden. Vom Programm LabView werden Operationsblöcke zur Verfügung gestellt und diese müssen den Anforderungen entsprechend angepasst werden.

Der AD-Wandler wird dabei durch die Blöcke **AI-Config**, **AI-Start**, **AI-Read** und **AI-Clear** dargestellt. Im Block AI-Config werden die Analogeingänge konfiguriert. Dieser Block ist für die Hardware und die Speicherbelegung verantwortlich. AI-Start startet eine im Speicher befindliche analoge Eingangsoperation. Dabei werden die Abtastrate, die Häufigkeit mit der die Kanäle ausgelesen werden sowie die Triggereinstellungen bestimmt. Gestartet wird sobald ein Signal erfasst wird. AI-Read liest Daten von einer gespeicherten Datenerfassung. AI-Clear löscht den analogen Eingangsbereich (Reset).

Nach dem Einlesen gelangen die Daten zu dem Block **Transpose 2D-Array**. Dort werden die zweidimensionalen Datenelemente von der Form $[i, j]$ in folgende transponierte Form $[j, i]$ gebracht. Es erfolgt eine Aufteilung der Daten in drei Arrays mit der Bezeichnung Spannung, Strom und Temperatur (Voltage-, Current- und Temperaturearray). Die Spannungs- und Stromwerte werden noch vor der FOR-Schleife mit dem Übersetzungsverhältnis des AD-Wandlers multipliziert.

In der **1. FOR-Schleife** kommt es zur Bildung der Wirkleistung P, entstehend aus der Multiplikation mit den Augenblickswerten über eine Periode integriert (Gleichung 65). Weiters wird der Mittelwert (Gleichung 68 und 69) von der Spannung und dem Strom berechnet um das Vorzeichen des Batteriestromes zu erhalten und um damit eine Aussage treffen zu können, ob die Batterie geladen oder entladen wird. Die Scheinleistung wird nach Gleichung 64 ge-

bildet. Dazu ist es nötig von den Strom- und Spannungswerten jeweils den Effektivwert (Gleichung 66 und 67) zu berechnen.

$$S = U_{eff} \cdot I_{eff} , \quad (64)$$

$$P = \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt , \quad (65)$$

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 \cdot dt} , \quad (66)$$

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 \cdot dt} , \quad (67)$$

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot dt , \quad (68)$$

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot dt . \quad (69)$$

In der **2. FOR-Schleife** (Temperatur) wird ein Offsetfaktor dazuaddiert. Der Faktor beträgt 3.571957 und muss zu jedem gemessenen Temperaturwert dazuaddiert werden damit die richtige Temperatur angezeigt wird. Dieser Offsetfaktor entspricht dem Temperaturbereich von -30°C bis 0°C des verwendeten Sensors. Anschließend wird mit dem gesamten Verstärkungsfaktor von 1235 durchdividiert (entspricht dem Verhältnis der Ausgangsspannung des Moduls DAQN-THERM-1, mit 10 Volt angegeben, und dem Eingangsspannungsbereiches des Sensors mit 8.095 mV). Nachfolgend wird eine Mittelwertbildung durchgeführt. Die Temperaturen T_1 und T_2 werden in mV angegeben.

Die berechneten Größen $(\bar{U}, \bar{I}, U_{eff}, I_{eff}, S, P, T_1, T_2)$ werden in einem **Array to Spreadsheet String** zusammengefasst. Dieser Block wandelt eine Arraystruktur beliebiger Dimension in eine Tabelle vom Typ String um.

Datum und Uhrzeit werden zu diesem String noch dazuaddiert, der zu dem Block **Concatenate String** führt. Dort werden die zusammengeknüpften Eingangsstrings und eindimensionalen Felder zu einem einzigen Ausgangsstring verbunden. Einstellungen für die Spalten- und Zeilentabulatoren können an dieser Stelle gemacht werden.

Anschließend werden die Daten in ein bereits geöffnetes Fileformat (Write File) geschrieben.

Die 1. und die 2. FOR-Schleife befinden sich in einer **WHILE-Schleife**.

Nach verlassen der WHILE-Schleife wird das File geschlossen und mit der Option **Open-Create-Replace-File** kann das File anschließend noch bearbeitet werden.

Die Einlesezeit kann fast beliebig eingestellt werden. Für die Messung hat sich ein Intervall von einer Sekunde bewährt.

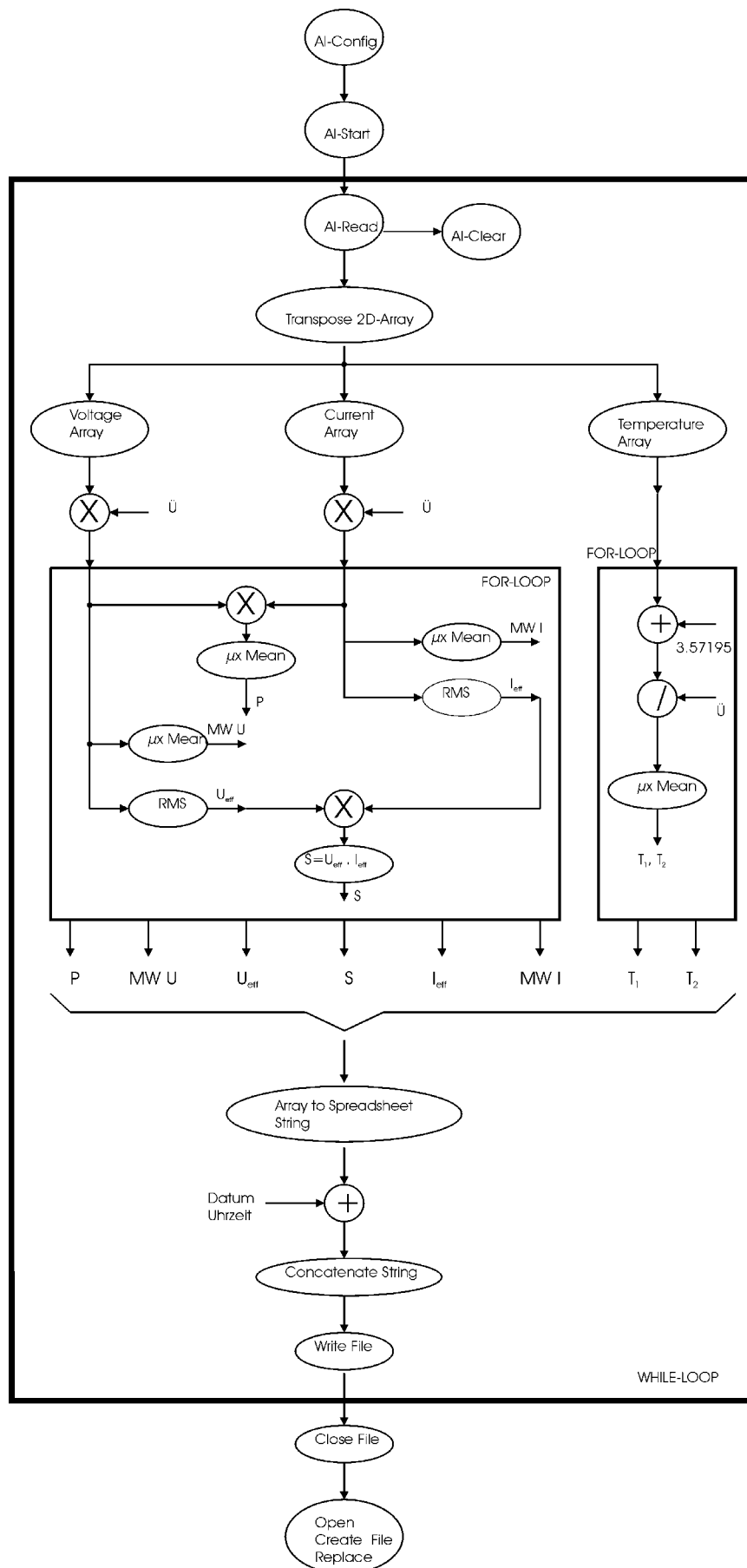


Abbildung 18 Flussdiagramm vom Einleseprogramm MessungDewetron32 (LabView).

7.2.7 Temperaturmessung

Für die Temperaturmessung wurden die Module DAQN-DMM im Dewetron Rack 8 gegen die DAQN-THERM Module ausgetauscht.

Daten des DAQN-THERM Module:

Thermocouple isolation amplifier

Cold junction compensation: intern.

Fehler: besser als **0.5%**, **typisch** besser als **+0.2%**.

Module type: DAQN-THERM-1.

TC type: K (NiCr-Ni) (Thermocouple type).

Temperatur range : **lower end : -30°C, higher end : 170°C.**

Appropriate voltage (adequate Spannung.): **lower end: -1.156 mV, higher end: 6.939 mV.**

Manual calibration:

-30°C/-1.156 mV: -5 Volt am Ausgang vom Modul.

(70)

170°C/ 6.939 mV: +5 Volt am Ausgang vom Modul.

(71)

Anschlüsse des Sensors (Seebeckeffekt¹⁷) werden in Abbildung 19 dargestellt:

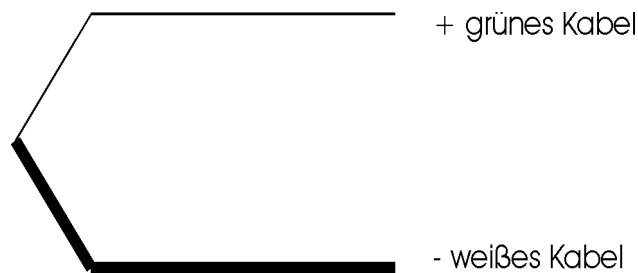


Abbildung 19 DAQN-THERM Anschlussbelegung.

In der Abbildung 45 sieht man Ausschnitte aus der Messverarbeitungskette vom Messprogramm MessungDewetron32.

Werden alle drei Kanäle in einer Schleife eingelesen, so kommt es anscheinend zu Schwierigkeiten mit dem Puffer, da zweimal drei Kanäle mit 400 Daten und einmal zwei Kanäle mit 400 Daten eingelesen werden müssen. Mit zwei FOR-Schleifen scheint dieses Problem gelöst zu sein. Das Schema der Verarbeitung des Temperatursignals kann in Abbildung 20 nachvollzogen werden.

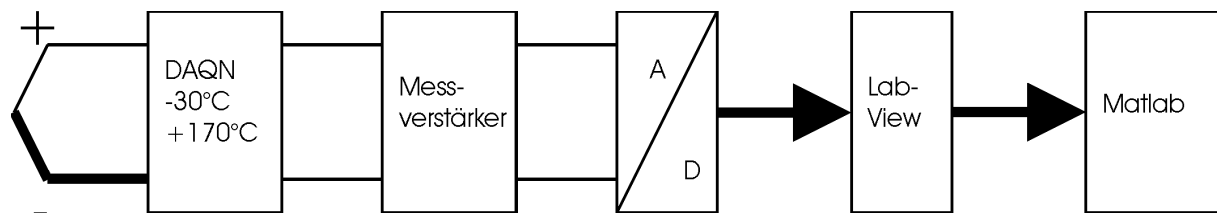


Abbildung 20 Messaufnehmer und Messumformer sind im DAQN-Modul bereits integriert. Darstellung der Verarbeitungskette des Temperatursignals (Spannung im mV Bereich) vom Messaufnehmer über den Messverstärker zum Dewetron Rack 8. Anschließend werden die Daten über die Analog/Digital-Karte ins LabView-Programm MessungDewetron32 eingelesen. Die Auswertung findet mit Hilfe des Programms Matlab 6.1 statt.

¹⁷ [43]: Seite 156-157.

7.2.8 Messung der Blindleistung

[35], [36], [37], [41]

Die Behandlung der Blindleistung wurde nach eingehender Literaturrecherche auf die Gleichung 73 festgelegt.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2 - D^2} , \quad (72)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} . \quad (73)$$

Q=Blindleistung.

S=Scheinleistung.

P=Wirkleistung.

D=Verzerrungsleistung.

Der Aufwand für eine korrekte Messung der Blindleistung nach Gleichung 72 anhand der in der Literatur angeführten Möglichkeiten wäre für diese Problemstellung zu aufwendig geworden. Mit dem verwendeten Messsystem bzw. mit dem Programm MessungDewetron32 werden die Ströme und Spannungen am System gemessen (Abbildung 15, Tabelle 9) und daraus werden die Schein- und Wirkleistungen berechnet. Nach Gleichung 73 wird die Blindleistung bestimmt, die Verzerrungsleistung wird dabei nicht berücksichtigt.

7.2.9 Fehler

Vor der Messung wurde der Offset der Zangen abgeglichen. Dies wurde mit dem Messverstärker durchgeführt und die dabei erreichten Werte waren im Bereich von 0.013 und 0.02 Volt. Der Messverstärker selbst wurde auch auf seinen Offset hin untersucht. Folgende Werte konnten ermittelt werden, wobei jeder Kanal in all seinen Eingangsstufen untersucht wurde. Bei einem Ausgangssignal von fünf Volt betragen der größte relative Offsetfehler 0.8 % und der kleinste relative Offsetfehler 0.006 %. Folgende Formel wurde der Berechnung zugrundegelegt:

$$F_{rel} = \frac{U_{aus} - U_{ein}}{U_{aus}} \cdot 100 . \quad (74)$$

F_{rel} = relativer Fehler in Prozent,

U_{ein} = Eingangsspannung am Modul (Klemmen sind kurzgeschlossen),

U_{aus} = Ausgangsspannung am Modul.

Die Fehlerklasse des Messverstärkers wird von der Fa. Dewetron mit +-0.05 % DC beim Modul DAQx-V und beim Modul DAQx-DMM mit besser als +-0.1 % DC angegeben. Für die Temperaturmessung mit dem Modul DAQN-THERM-1 ist ein Fehler besser als 0.5 % angeführt.

Bei der Tankskala existiert ein Ablesefehler, der größtmäßig nicht erfasst werden kann. Bei der Interpretation der Messwerte ist darauf Bezug zu nehmen.

7.2.10 Auswertung

Die Auswertung erfolgt mit dem Programm Matlab 6.1 (Mathworks Inc., Natick, USA). Es werden sowohl Messdaten von der von IdaTech mitgelieferten Systemsoftware Data Viewer 1.1 als auch von der eigenen Messung verwendet. Beim direkten Vergleich gleicher Messdaten hat sich eine nicht unerhebliche Differenz gezeigt. Als Ursache wurde die Auflösung der Sensoren im Nulldurchgang erkannt (betrifft Batteriestrom). Weiters werden Systemverluste (zwischen Fuel Cell und DC/DC-Konverter wird ein Strom von ungefähr 0.4 A an die Cassandra REV 2 Platine von Ballard geleitet) nicht angeführt, die aber mit dem Programm MessungDewetron32 erfasst werden. Im Zuge der Auswertung hat es sich gezeigt das Matlab 6.1 für die Auswertung der Daten einen sehr gute Wahl aufgrund seiner vielfältigen mathematischen Möglichkeiten war. Die Datenmenge bewegt sich bei ungefähr 30 000 Werten. Da die gesamte Datenmanipulation in Matlab stattfindet bleibt dadurch auch eine gewisse Rechengenauigkeit erhalten, die sonst bei Verwendung unterschiedlicher Programme verloren gehen könnte.

7.3 Messergebnisse

7.3.1 Wirkungsgrad

Als Ausgangsbasis für die Messung sind folgende Voraussetzungen anzugeben:

Für die Messung des Wirkungsgrades wird der Fuel Prozessor und die Fuel Cell gemeinsam als ein Block betrachtet da der Wasserstoff, der vom Fuel Prozessor produziert wird, nicht gemessen wird. Weiters gibt es den Block DC/DC-Konverter und den Block Wechselrichter.

Prinzipiell gilt für die folgende Wirkungsgradberechnungen, das die Ausgangsenergie W_{aus} ins Verhältnis zur Eingangsenergie W_{ein} gesetzt wird (stationäre Verhältnisse).

$$\eta = \frac{W_{\text{aus}}}{W_{\text{ein}}} . \quad (75)$$

Der Gesamtwirkungsgrad wird nach Gleichung 76 ermittelt:

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{FPFC}} \cdot \eta_{\text{DC}} \cdot \eta_{\text{WR}} . \quad (76)$$

Die Angabe des Energieinhaltes des Methanol-Wassergemisches ist auf $\frac{Wh}{l}$ bezogen. Damit ein korrekter Wirkungsgrad der einzelnen Komponenten als auch des gesamten Systems berechnet werden kann, wird bei der Auswertung jene Zeit berücksichtigt, in der das Methanol-Wassergemisch konsumiert wird.

Ändert sich der Betriebszustand dauernd so stellen sich auch unterschiedliche Wirkungsgrade ein, man spricht in diesem Zusammenhang von Nutzungsgraden. Der Nutzungsgrad beschreibt das Verhältnis von zugeführter zu abgeführter Energie. Wird das System jedoch mit konstanten Lasten am Ausgang des Wechselrichters betrieben, so stellen sich stationäre Verhältnisse ein, die wiederum ein Rechnen mit Wirkungsgraden erlauben.

7.3.1.1 Block FPFC

Der Konsum des Methanol-Wassergemisches wird durch das Ablesen der Skalierung am Tank ermittelt. Nach Gleichung 77 wird mit Hilfe des Tankvolumens die elektrische Energie des Brennstoffs berechnet.

$$W_{\text{ein,FPFC}} = W_{\text{Brennstoff}} = V \cdot w_M \cdot 3600. \quad (77)$$

$W_{\text{Brennstoff}}$ = elektrische Energie des Brennstoffs in Ws,

V = Menge des Brennstoffs in Liter,

w_M = spezifische Energiedichte des Methanol-Wassergemisches in $\frac{\text{Wh}}{\text{l}}$.

Als Ausgangsenergie $W_{\text{aus,FPFC}}$ wird die gemessene Energie am Ausgang der Fuel Cell verwendet. Die Energie wird durch die Messgrößen U_1 und I_1 (Abbildung 15) ermittelt.

$$W_{\text{aus,FPFC}} = \int \bar{U}_1 \cdot \bar{I}_1 \cdot dt. \quad (78)$$

7.3.1.2 Block DC/DC-Konverter

Die Eingangsenergie $W_{\text{ein,DC/DC}}$ des Gleichspannungswandlers entspricht der Ausgangsenergie $W_{\text{aus,FPFC}}$ des vorangehenden Blocks FPFC. Der Wirkungsgrad des Gleichspannungswandlers umfasst auch den Eigenbedarf des Systems (Hilfsaggregate).

$$W_{\text{ein,DC/DC}} = W_{\text{aus,FPFC}}. \quad (79)$$

Die Ausgangsenergie wird durch die Messgrößen U_2 und I_3 bestimmt.

$$W_{\text{aus,DC/DC}} = \int \bar{U}_2 \cdot \bar{I}_3 \cdot dt. \quad (80)$$

Der Strom I_3 wird zeitlich nicht aufgezeichnet sondern nur im Messprotokoll mit jedem aufgenommenen Messpunkt mitnotiert.

7.3.1.3 Block Wechselrichter

Die Eingangsenergie des Wechselrichters $W_{\text{ein,WR}}$ entspricht der Ausgangsenergie $W_{\text{aus,DC/DC}}$ des Gleichspannungswandlers.

$$W_{\text{ein,WR}} = W_{\text{aus,DC/DC}}. \quad (81)$$

Die Ausgangsenergie wird durch die Messgrößen U_3 und I_2 bestimmt.

$$W_{\text{aus,WR}} = \int u_3 \cdot i_2 \cdot dt \quad (82)$$

Ein weiterer Faktor der berücksichtigt wird ist die Zeit die verstreicht bis z.B. zwei Liter Brennstoff verbraucht sind. Für die Ermittlung des Wirkungsgrades bei konstanter bzw. dynamischer Last gilt das die Zeit für eine verbrauchte Menge Brennstoff mitgeschrieben wird.

Für die Interpretation der Messkurven sollte man sich Abbildung 2 bzw. Abbildung 3 vergegenwärtigen. Bei ansteigenden Strom bricht die Spannung der Zelle ein (Abbildung 3). Der Wirkungsgrad wird nach Gleichung 7 von der reversiblen Zellspannung mitbestimmt. Die Einbrüche der Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Leistungen sollte nicht auf die Brennstoffzelle selbst bezogen werden, sondern vielmehr ist darauf Bedacht zu nehmen das die einzelnen Komponenten wie Fuel Prozessor, DC/DC-Konverter und Wechselrichter starken Einfluss dabei nehmen. Bei größerer Leistungsabgabe des Systems werden die Pumpen und Lüfter in einem anderen Betriebszustand versetzt. Daraus resultiert das für diese Nebenaggregate mehr Leistung benötigt wird. Nachdem die Hilfsaggregate vermutlich hinzuge-

kaufte wurden kann man davon ausgehen das es keine besonders gute Abstimmung für den Leistungsbezug in diesen unterschiedlichen Betriebszuständen gibt. Kleine Hilfsaggregate haben vielfach keinen besonders großen Wirkungsgrad.

7.3.1.4 Wirkungsgrad bei konstanter Last am Ausgang des Wechselrichters

Als Last wurden Glühlampen mit maximal 900 Watt in Form einer Lichterkette und Ohmsche Widerstände eingesetzt (Abbildung 16).

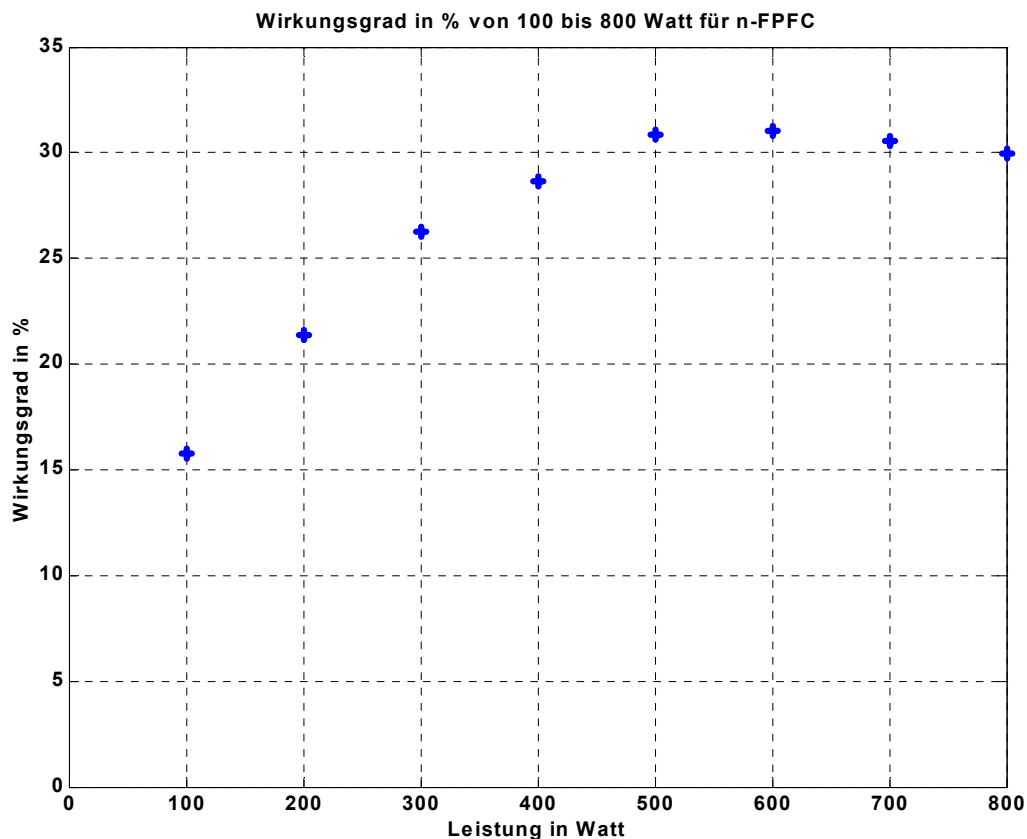


Abbildung 21 Wirkungsgrad des Blockes Fuel Prozessors/Fuel Cell in Abhängigkeit der Ausgangsleistung des Wechselrichters PROsine 1000i.

In Abbildung 21 sieht man den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der abgegebenen Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i. Das Maximum wird bei 600 Watt mit η -FPFC= 31.09 % erreicht. Für den Block Fuel Prozessor/Fuel Cell ergibt sich ein η -FPFC von über 30 %, das ist ein sehr guter Wert für den verwendeten Fuel Prozessor.

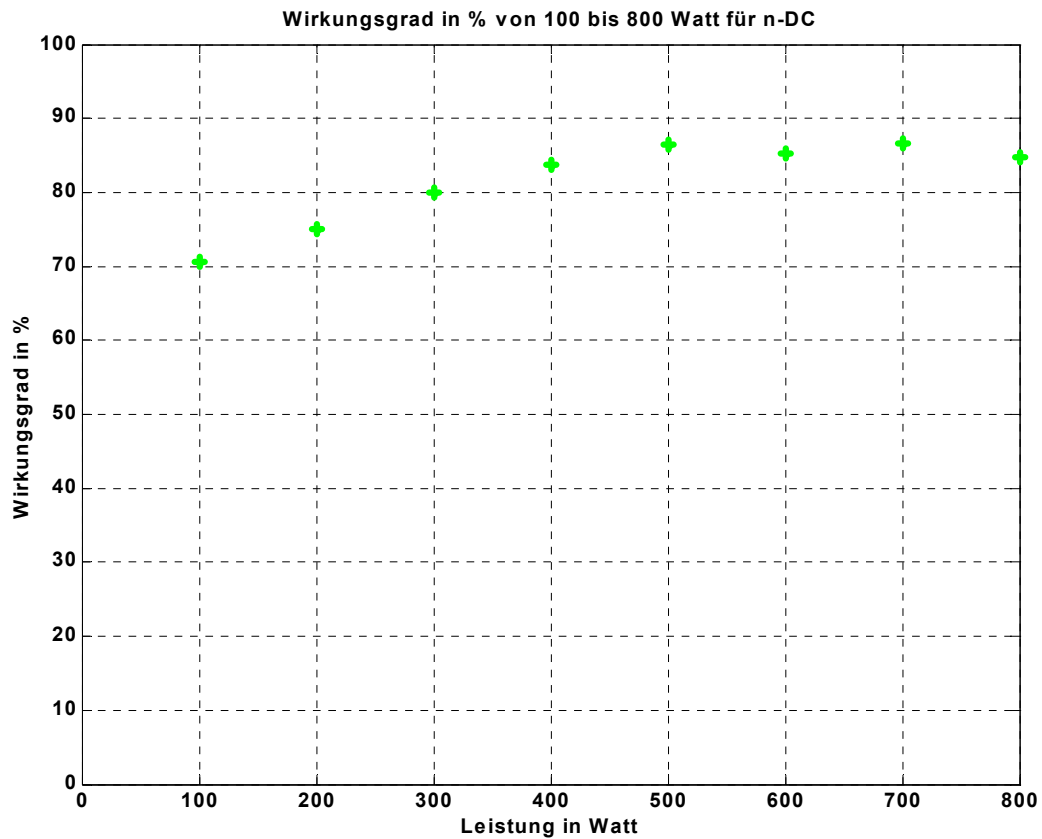


Abbildung 22 Wirkungsgrad des DC/DC-Konverters in Abhängigkeit der Ausgangsleistung des Wechselrichters PROsine 1000i.

In Abbildung 22 sieht man den maximalen Wirkungsgrad des DC/DC-Konverters bei 700 Watt mit $\eta_{\text{DC}} = 87.97\%$. Das Maximum tritt jetzt bei 700 Watt auf. Zwischen 500 und 800 Watt pendelt der Wirkungsgrad sich bei ungefähr 85% ein.

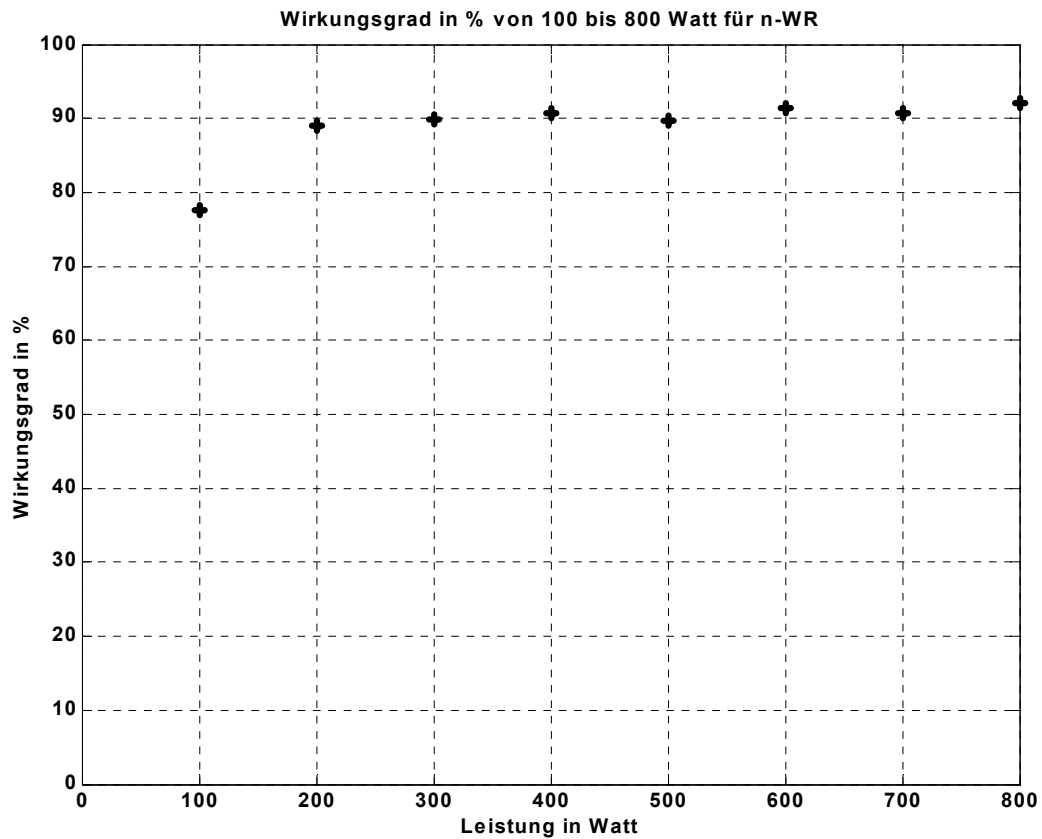


Abbildung 23 Wirkungsgrad des Wechselrichters in Abhängigkeit der Ausgangsleistung des Wechselrichters PROsine 1000i.

In Abbildung 23 erreicht der Wechselrichter seinen maximalen Wirkungsgrad bei 800 Watt mit $\eta\text{-WR} = 92.97\%$. Die Angaben bezüglich des Wirkungsgrades des Hersteller¹⁸ lauten auf 88.5 % bei einer Belastung von 700 Watt am Ausgang (vgl. Tabelle 13). Zwischen 200 und 800 Watt liegt der Wirkungsgrad bei einem Wert von ungefähr 90%.

¹⁸ [46], Seite 17.

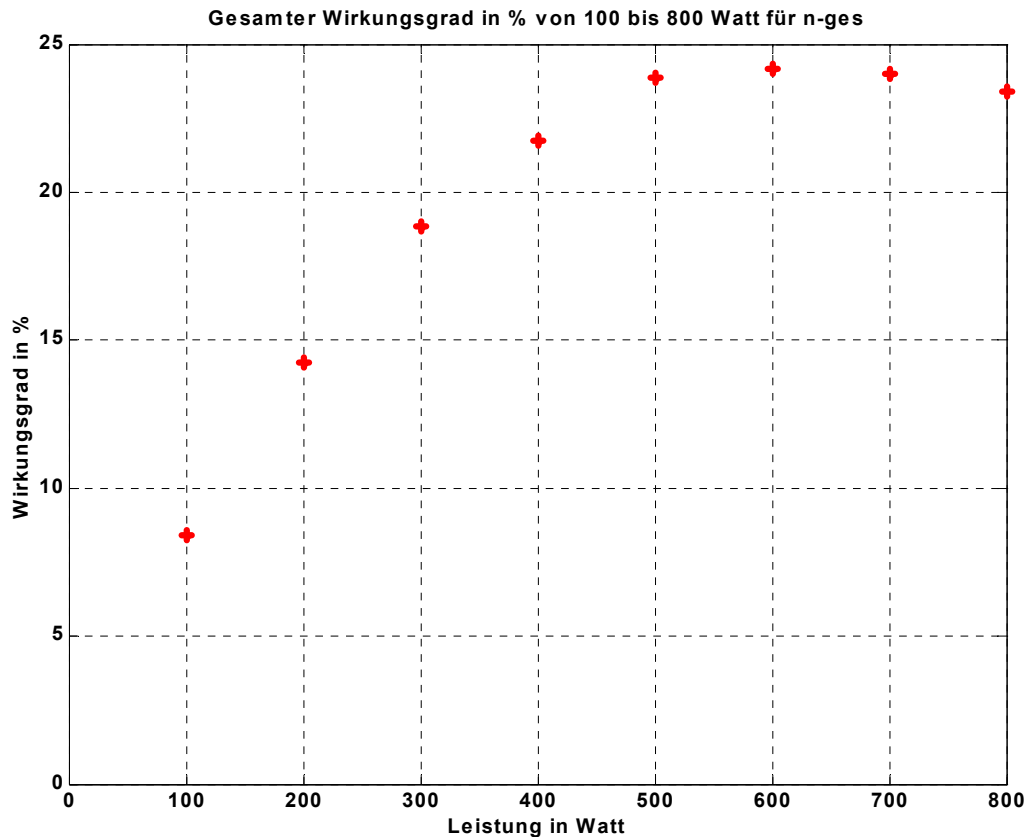


Abbildung 24 Wirkungsgrad des gesamten FC 1200 Systems in Abhängigkeit der Ausgangsleistung am Wechselrichter PROsine 1000i.

Der gesamte maximale Wirkungsgrad des FC 1200 Systems wird, wie man in Abbildung 24 sieht bei 600 Watt Last erreicht und beträgt η -Gesamt = 23.96 %. Nach dem Scheitelpunkt bei 600 Watt nimmt der Wirkungsgrad ab und fällt bei 800 Watt auf den Wert von 23.42%. Die Ermittlung des Gesamtwirkungsgrades erfolgt nach Gleichung 76.

7.3.1.5 Wirkungsgrad bei dynamischer Last am Ausgang des Wechselrichters

Für die Nachbildung einer dynamische Last wird mit Hilfe einer Zeitschaltuhr in einem fünfzehn Minuten Intervall die Last am Ausgang des Wechselrichters von 300 auf 500 Watt hin- und hergeschaltet. Als Grundlast dient eine Lichterkette und ein Ohmscher Widerstand. Beim Umschalten wird ein zusätzlicher Widerstand parallel zur Lichterkette als Belastung aufgeschaltet (Schaltung siehe Abbildung 16).

	300 Watt	500 Watt	300 <=> 500 Watt
WG-GES	0.1862	0.2324	0.2069
WG-FPFC	0.2639	0.3005	0.2775
WG-DC	0.8037	0.8633	0.8514
WG-WR	0.8778	0.8961	0.8761

Tabelle 10 Wirkungsgrad des Systems bei alternierendem Lastsprung zwischen 300 und 500 Watt Ausgangsleistung am Wechselrichter PROsine 1000i.

Der Gesamtwirkungsgrad WG-GES (Tabelle 10) der dynamischen Laständerung liegt mit 20.69 % zwischen denen von 300 und 500 Watt. Ähnlich verhält es sich mit den Werten von den Blöcken WG-FPFC (27.75 %) und WG-DC (85.14 %). Beim Wirkungsgrad des Wechselrichters liegt der Wert mit 87.61 % unter dem Wert von 300 Watt (87.78 %). Bei der Abweichung könnte es sich um einen Messfehler handeln. Man erwartet Wirkungsgradwerte deren

untere Grenze über den Werten von den Messungen bei 300 Watt und deren obere Grenze unter den Werten von den Messungen bei 500 Watt liegen. In Tabelle 11 und in Tabelle 12 werden weitere Wirkungsgrade als Ergebnisse von Lastsprüngen angeführt. In Tabelle 12 werden die Erwartungen, das die gemessenen Werte für dynamische Zustände zwischen denen der stationären Zuständen zu liegen kommen, erfüllt.

	500 Watt	700 Watt	500 <=> 700 Watt
WG-GES	0.2324	0.2292	0.2256
WG-FPFC	0.3005	0.2955	0.2915
WG-DC	0.8633	0.8797	0.8714
WG-WR	0.8961	0.8818	0.8881

Tabelle 11 Wirkungsgrad des Systems bei alternierendem Lastsprung zwischen 500 und 700 Watt Ausgangsleistung am Wechselrichter PROsine 1000i.

	200 Watt	400 Watt	200 <=> 400 Watt
WG-GES	0.1385	0.2161	0.1855
WG-FPFC	0.2109	0.2846	0.259
WG-DC	0.7632	0.8447	0.8277
WG-WR	0.8605	0.8991	0.8654

Tabelle 12 Wirkungsgrad des Systems bei alternierendem Lastsprung zwischen 200 und 400 Watt Ausgangsleistung am Wechselrichter PROsine 1000i.

7.3.1.6 Übersicht über alle gemessenen Wirkungsgrade

100 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
14.06.02	0,0825	0,1565	0,7324	0,7196
18.06.02	0,0863	0,166	0,7233	0,7193
19.06.02	0,0849	0,1569	0,6875	0,7873
03.09.02	0,0821	0,1523	0,6781	0,7955
gemittelt	0,0840	0,1579	0,7053	0,7554
200 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
14.06.02	0,1442	0,2164	0,6828	0,9759
20.06.02	0,1428	0,2116	0,8061	0,8376
11.06.02	0,1442	0,2164	0,7511	0,8872
03.09.02	0,1385	0,2109	0,7632	0,8605
gemittelt	0,1424	0,2138	0,7508	0,8903
300 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
12.06.02	0,1872	0,2589	0,7643	0,9465
21.06.02	0,1924	0,2649	0,8334	0,8715
02.09.02	0,1862	0,2639	0,8037	0,8778
gemittelt	0,1886	0,2626	0,8005	0,8986
400 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
13.06.02	0,2271	0,2987	0,8446	0,9002
13.06.02	0,2136	0,2807	0,8451	0,9003
14.06.02	0,2137	0,2817	0,8166	0,9291
28.07.02	0,2161	0,2846	0,8447	0,8991
gemittelt	0,2176	0,2864	0,8378	0,9072
500 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
11.07.02	0,2528	0,3251	0,8815	0,8824
28.08.02	0,2316	0,2994	0,8477	0,9124
29.08.02	0,2324	0,3005	0,8633	0,8961
gemittelt	0,2389	0,3083	0,8642	0,8970
600 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
15.07.02	0,2563	0,3253	0,8809	0,8945
28.08.02	0,2293	0,2948	0,834	0,9327
02.09.02	0,2396	0,3109	0,8414	0,916
gemittelt	0,2417	0,3103	0,8521	0,9144
700 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
16.07.02	0,2447	0,3085	0,8706	0,911
25.07.02	0,246	0,3122	0,8504	0,9264
30.08.02	0,2292	0,2955	0,8797	0,8818
gemittelt	0,2400	0,3054	0,8669	0,9064
800 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
25.07.02	0,241	0,3062	0,8511	0,9247
30.08.02	0,2253	0,2883	0,8586	0,9105
02.09.02	0,2364	0,3052	0,8331	0,9297
gemittelt	0,2342	0,2999	0,8476	0,9216
300=>500 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
17.07.02	0,2069	0,2775	0,8514	0,8761
500=>700 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
18.10.02	0,2256	0,2915	0,8714	0,8881
200=>400 Watt	WG-ges	WG-FPFC	WG-DC	WG-WR
22.10.02	0,1855	0,259	0,8277	0,8654

Tabelle 13 Alle gemessenen Wirkungsgrade von 100 bis 800 Watt mit Berücksichtigung der dynamischen Verhältnisse.

In Tabelle 13 werden alle gemessenen Wirkungsgrade des Fuel Cell System 1200 angeführt. WG-ges entspricht dem Gesamtwirkungsgrad des Systems, WG-FPFC entspricht dem Wirkungsgrad vom Block Fuel Prozessor/Fuel Cell, WG-DC entspricht dem Wirkungsgrad des Blocks DC/DC-Konverter und WG-WR entspricht dem Wirkungsgrad des Blocks Wechselrichter (PROsine 1000i). Eine Mittelung der Messwerte wurde auch durchgeführt.

Die Ergebnisse der Wirkungsgradmessung schwanken in einem Bereich von etwa 10 %. Als Ursache dürften folgende Faktoren, die nicht näher bestimmt werden können, gelten:

- Methanol
- Ablesefehler
- Messfehler
- Temperatur zum Zeitpunkt der Messung

7.3.2 Temperatur

In Abbildung 25 und Abbildung 26 ist der Temperaturverlauf im Stackbereich als auch am Gebläseausgang (Ventilator) dargestellt. Am Tag der Aufzeichnung wurde das zeitliche Verhalten des FC 1200 Systems untersucht. Lastsprünge von 200 auf 300 Watt wurden von 8:19 Uhr bis 9:10 Uhr durchgeführt, von 300 auf 500 Watt von 9:56 Uhr bis 11:22 Uhr, von 300 auf 600 Watt von 12:21 Uhr bis 14:07 Uhr und von 300 auf 700 Watt von 14:13 Uhr bis 15:06 Uhr. Der Stack wird also abhängig von der Belastung mit frischer Luft gekühlt. Das Absinken der Temperatur T1 und T2 ist auf das Umschalten der Last (z.B. von 500 auf 300 Watt) zurückzuführen. Die Temperatur liegt in einem Bereich von 50 °C bis 70 °C für T1 und für T2 in einem Bereich von 60 °C bis 80 °C.

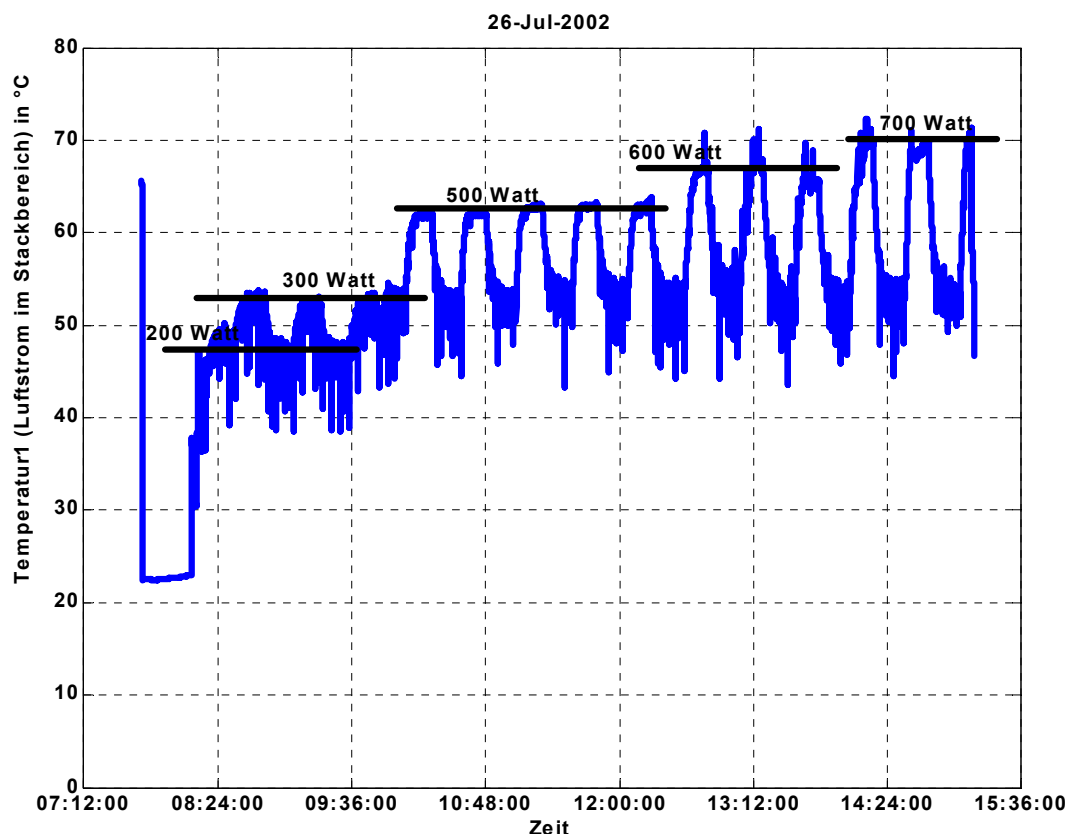


Abbildung 25 Temperatur des Luftstromes im Stackbereich in °C.

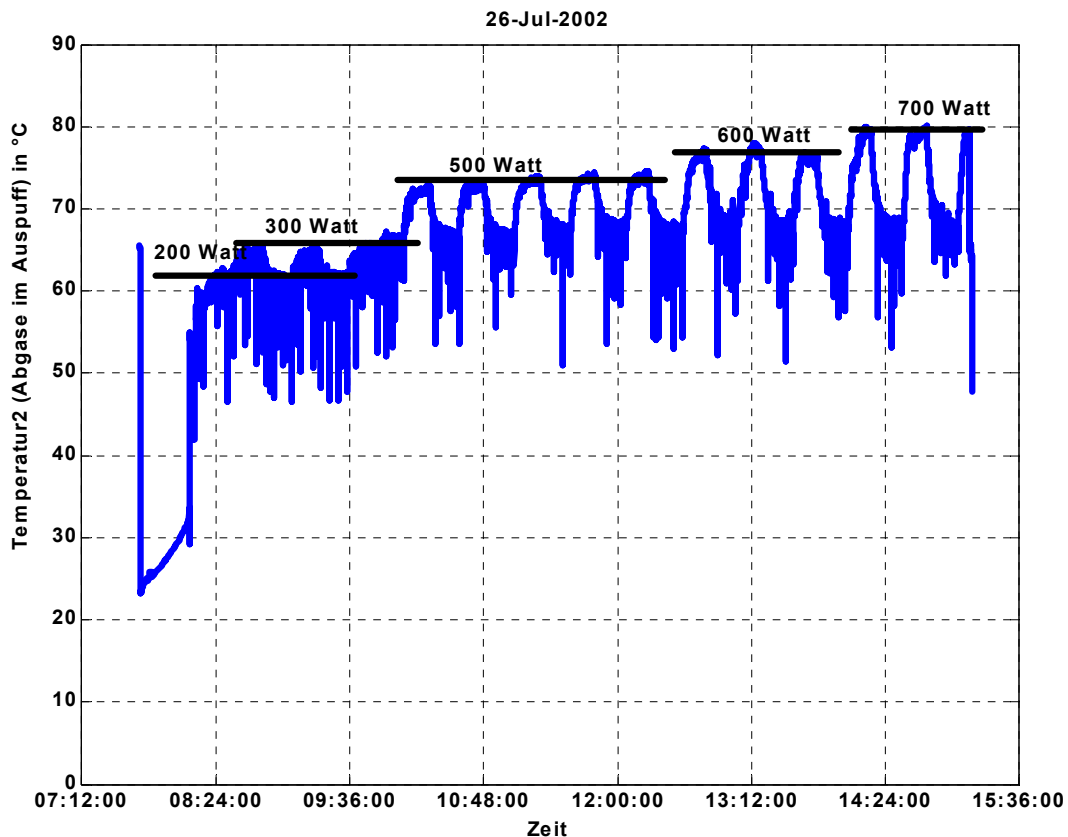


Abbildung 26 Temperatur der Abgase am Gebläseausgang in °C.

7.3.3 Emissionsmessungen

7.3.3.1 Allgemeines zur Emissionsmessung

Für die Messung wurde ein 110 cm langer Schlauch genommen an dessen Ende die Emissionen gemessen werden. Laminare und turbulente Strömungen verhindern eine korrekte Messung direkt am Gebläseausgang. Als Faustformel kann die Länge mit dreimal dem Durchmesser vom Auspuffrohr bestimmt werden. Es wurde ein Loch in den Auspuff geschnitten und der Messschlauch darin 10 cm tief versenkt.

7.3.3.2 Emissionswerte in Abhängigkeit der Zeit

Zur Zeit der Aufzeichnung der Emissionen wurde das System mit 800 Watt von 8:31 Uhr bis 10:21 Uhr, mit 600 Watt von 10:48 Uhr bis 13:18 Uhr und von 13:28 Uhr bis 17:20 Uhr mit 300 Watt Last am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i betrieben. Als Last wurde eine Lichterkette mit maximal 9x100 Watt sowie ein Ohmscher Widerstand verwendet.

Die Prozentangaben sind Volumprozentangaben.

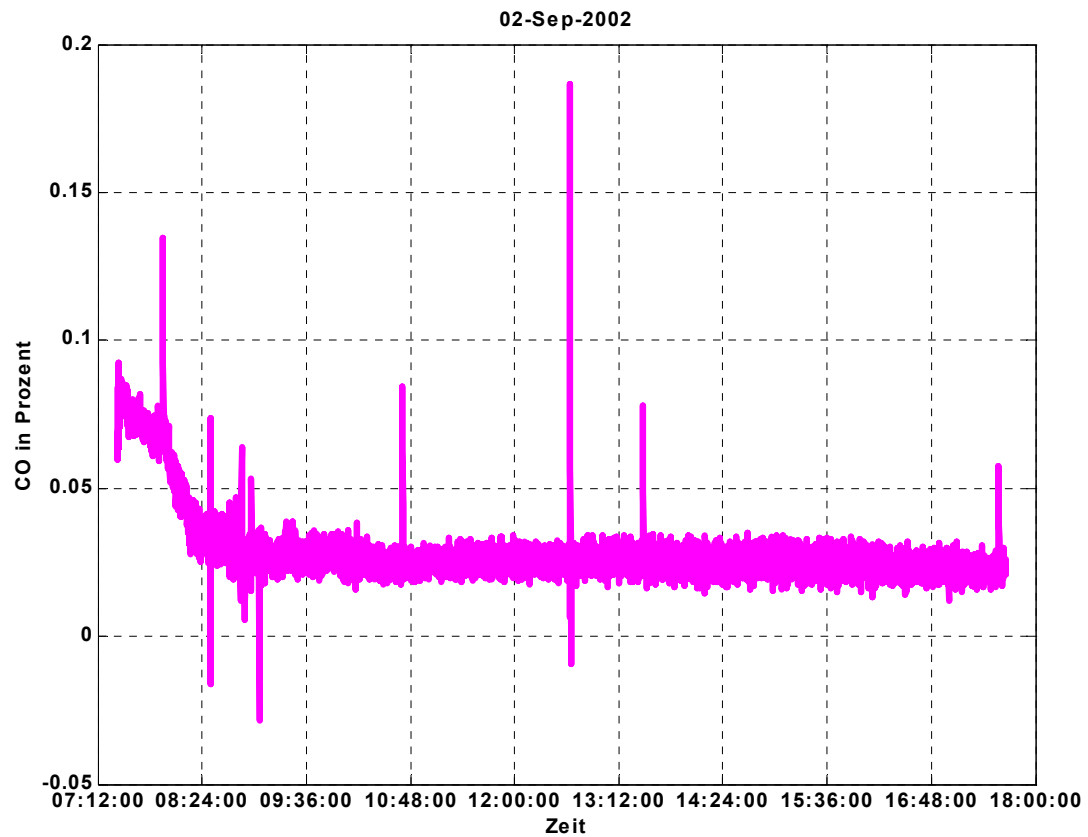


Abbildung 27 Verlauf des Kohlenmonoxidgehaltes in Prozent über die Zeit aufgetragen.

In Abbildung 27 sieht man das der maximale Kohlenmonoxidwert unter dem Wert von 0.2 % liegt.

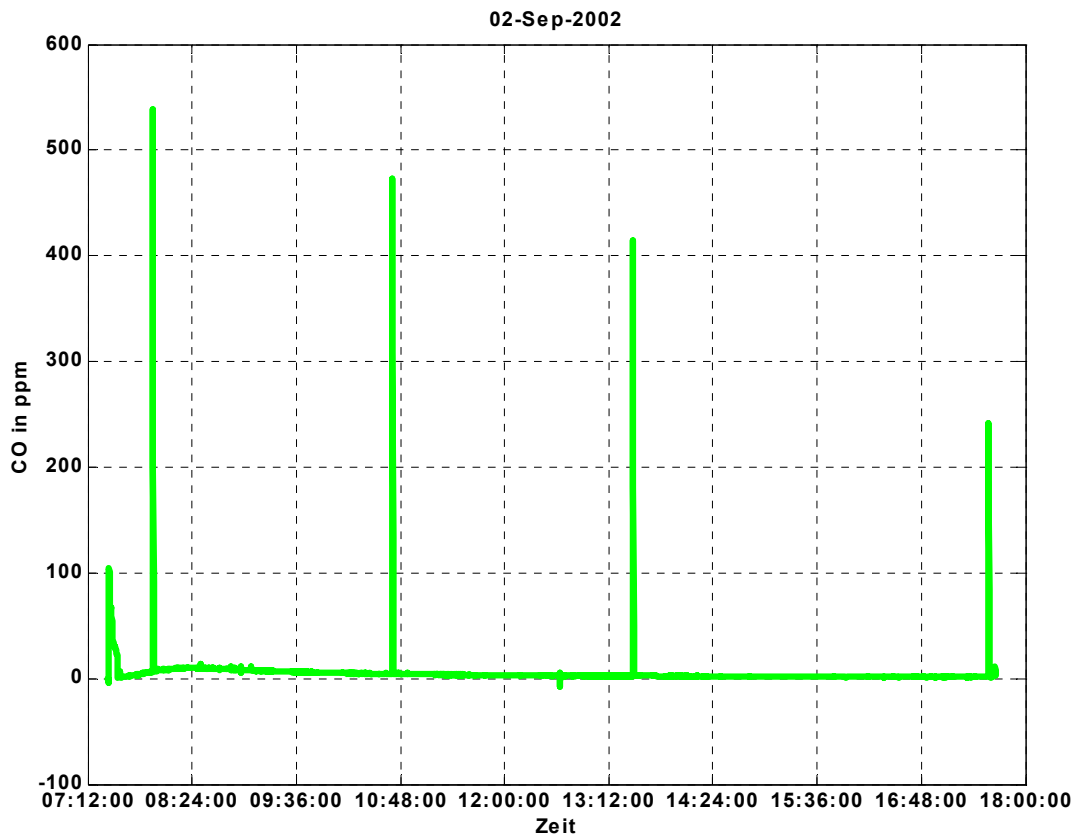


Abbildung 28 Verlauf des Kohlenmonoxidgehalts in ppm über die Zeit aufgetragen.

Beim aufschalten einer Last von 800 Watt sieht man in Abbildung 28 wie der Kohlenmonoxidgehalt auf einen Wert von über 500 ppm ansteigt. Bei 600 Watt liegt der CO-Gehalt unter 500 ppm und bei 300 Watt bei etwa 400 ppm. Beim Abschalten der Last wird immerhin noch ein Wert von ca. 250 ppm erreicht. Zwischen diesen dynamischen Vorgängen liegt der CO-Gehalt aber bei Null. Die Spitzen sind vermutlich auf die sauerstoffarme Verbrennung bei Lastwechsel im Fuel Prozessor zurückzuführen. Diese Werte treten natürlich in sehr kleinen Zeiteinheiten auf und haben daher keine nennenswerte Auswirkung auf die Umwelt. Trotzdem sollte man die Regelung für den Brenner im Fuel Prozessor optimieren da bei einem flächendeckenden Einsatz dieses Systems in Haushalten mit dynamischen Belastungen unter Umständen diese Spitzenwerte sich zu einem belastenden Faktor für die Umwelt entwickeln kann.

In Abbildung 29 und Abbildung 30 sieht man den Kohlendioxidgehalt abhängig von der Last aufgetragen. Bei den Laständerungen von 800, 600 und 300 Watt beträgt der Kohlendioxidgehalt 0.5, 0.43 und 0.33 Prozent bzw. 2200, 2000 und 1500 ppm.

In Abbildung 31 erkennt man das der Methangehalt während des Betriebs bei Null liegt. Das Verhältnis von Wasserstoff/Stickstoff ist in der Startphase des Systems am größten (Abbildung 32). Im Betrieb pendelt es sich auf einen konstanten Wert ein. Wiederum ist zu beobachten das bei Verringerung der Last das Verhältnis, ähnlich wie beim Kohlenmonoxidgehalt, ansteigt.

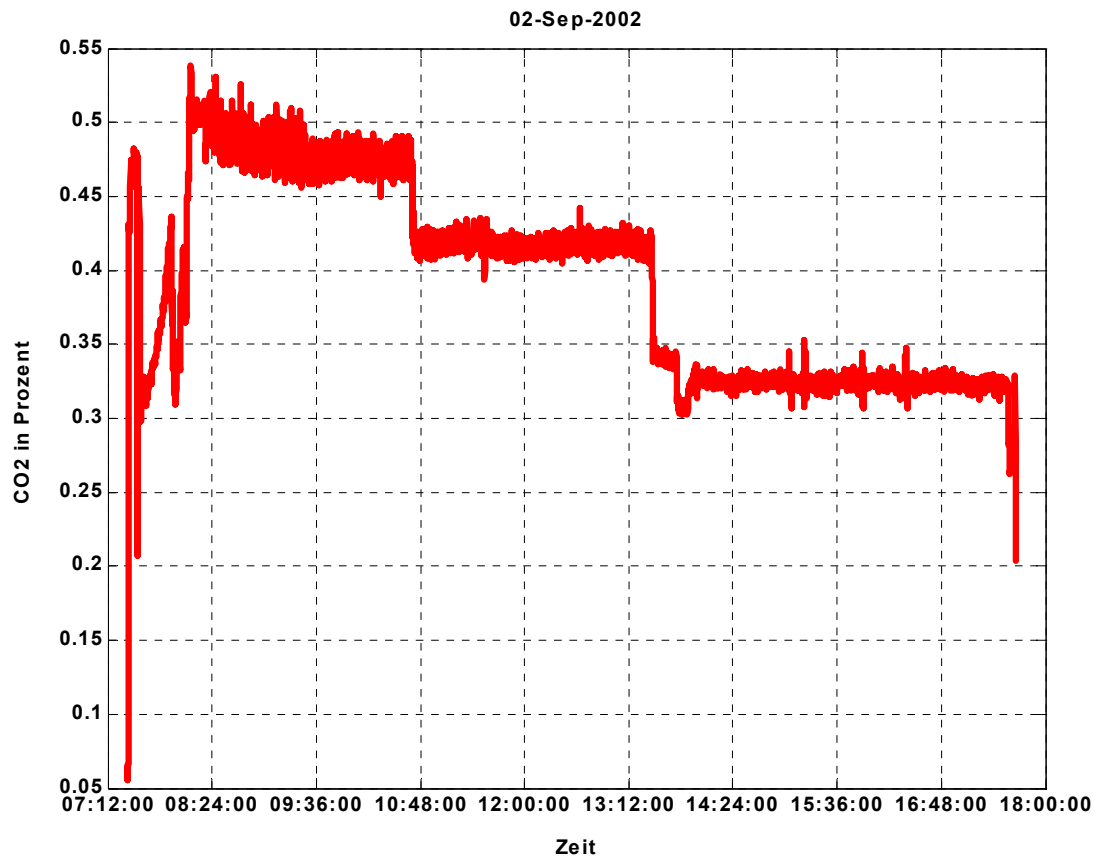


Abbildung 29 Verlauf des Kohlendioxidgehalts in Prozent über die Zeit aufgetragen.

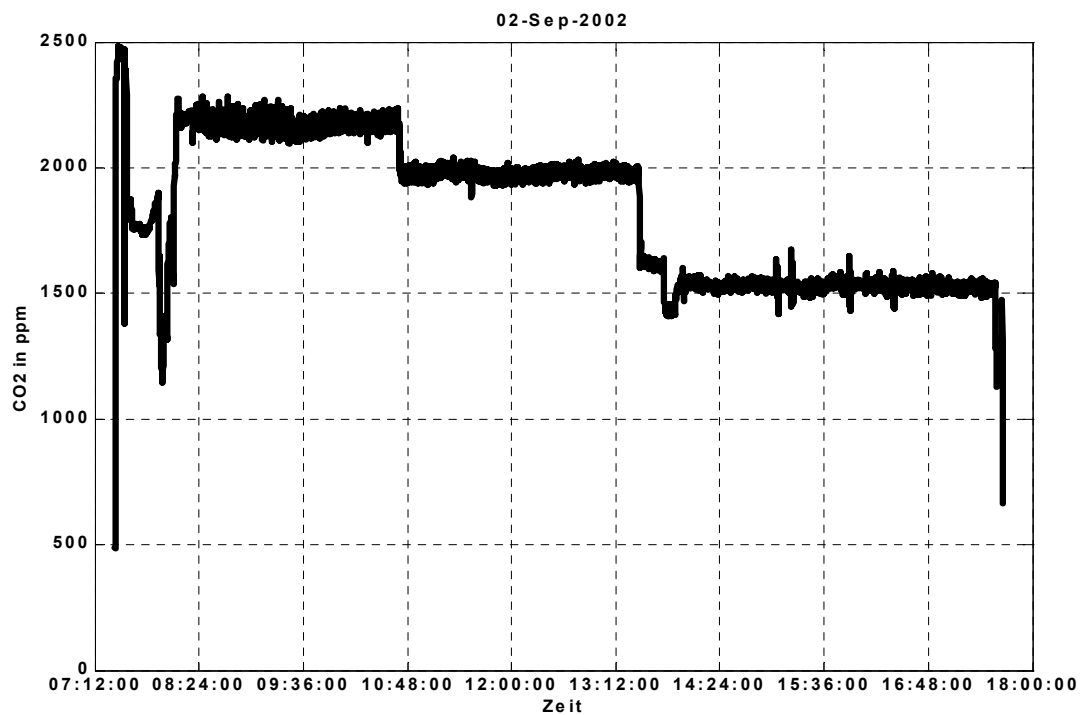


Abbildung 30 Verlauf des Kohlendioxidgehalts in ppm über die Zeit aufgetragen.

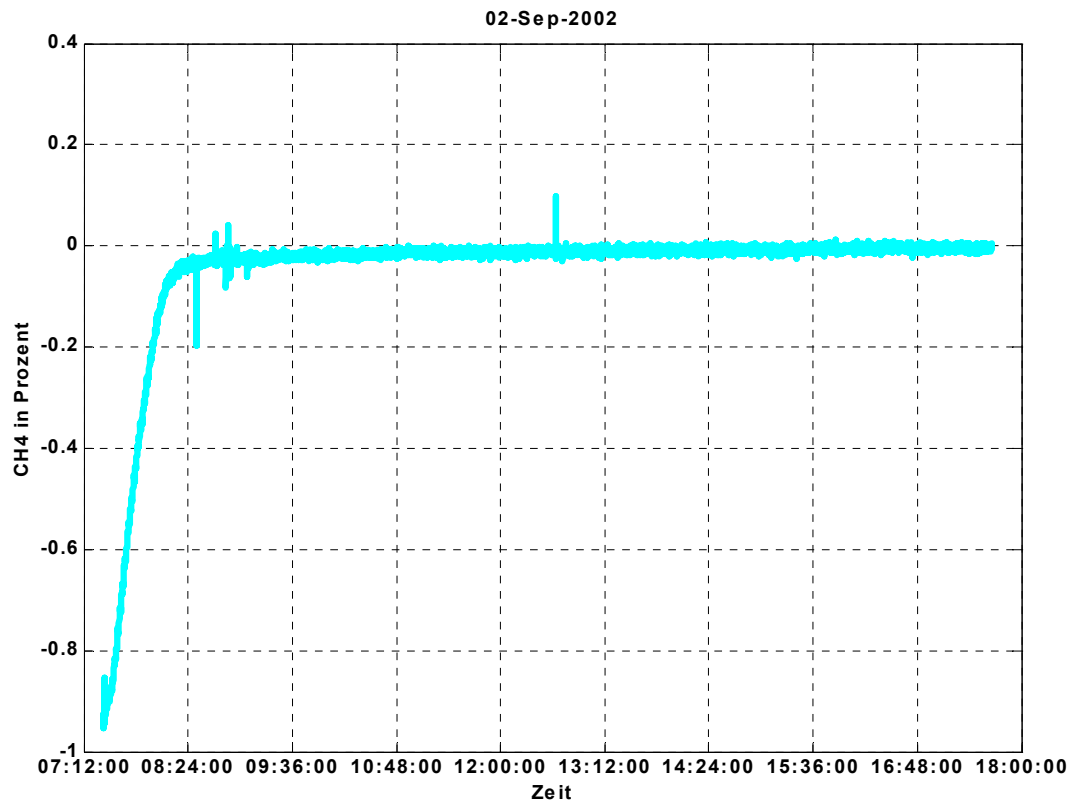


Abbildung 31 Verlauf des Methangehalts in Prozent über die Zeit aufgetragen.

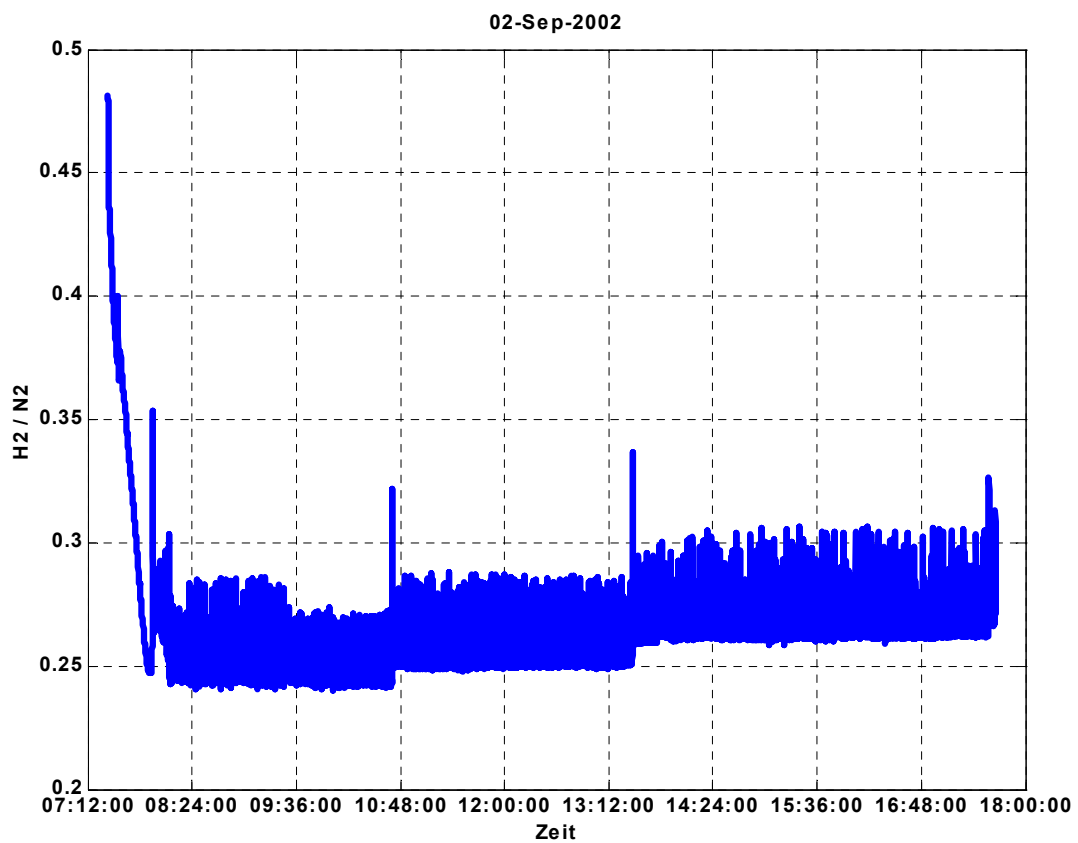


Abbildung 32 Verlauf des H2/N2 Verhältnisses über die Zeit aufgetragen.

7.3.3.3 Emissionswerte in Abhängigkeit der Leistung

Nicht nur die Höhe der Emissionen während einer Betriebsdauer sind aussagekräftig sondern auch deren Abhängigkeit von der am Ausgang des Wechselrichters angeschlossenen Last.

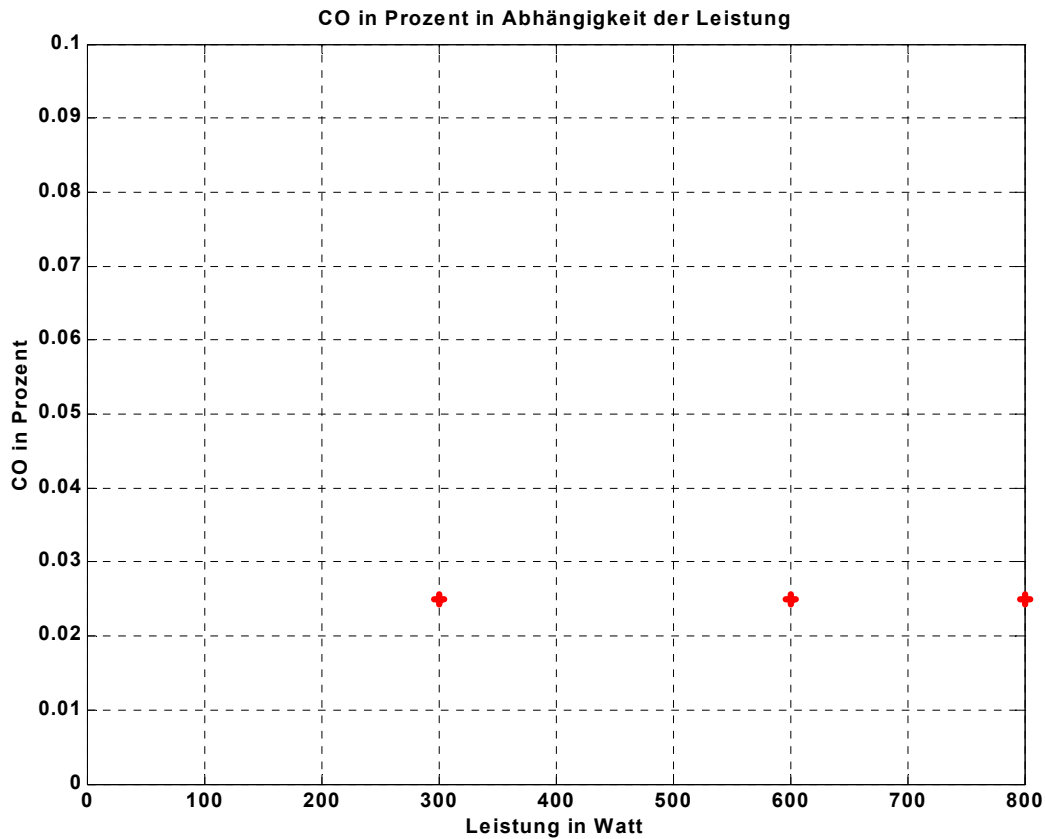


Abbildung 33 Kohlenmonoxidgehalt in Prozent in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.

In Abbildung 33 und Abbildung 34 sieht man das der Emissionsausstoß im stationären Zustand mit konstanter Last am Ausgang des Wechselrichters keine Abhängigkeit von der Leistung besitzt.

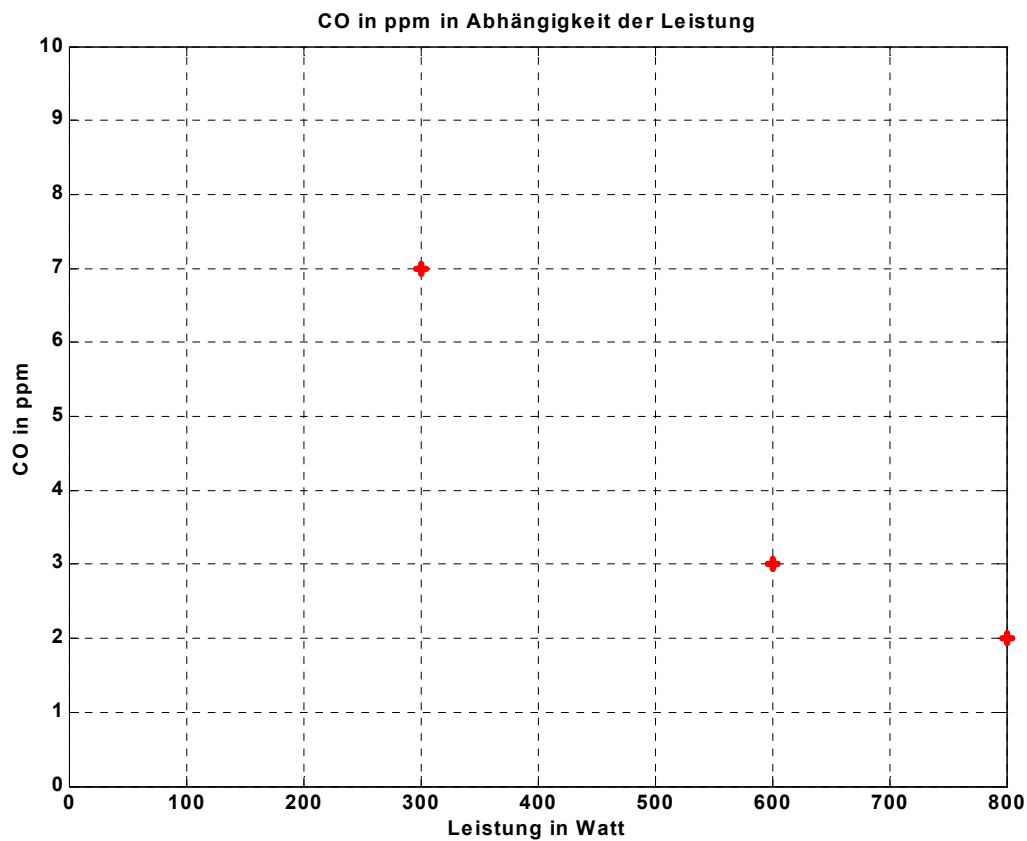


Abbildung 34 Kohlenmonoxidgehalt in ppm in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.

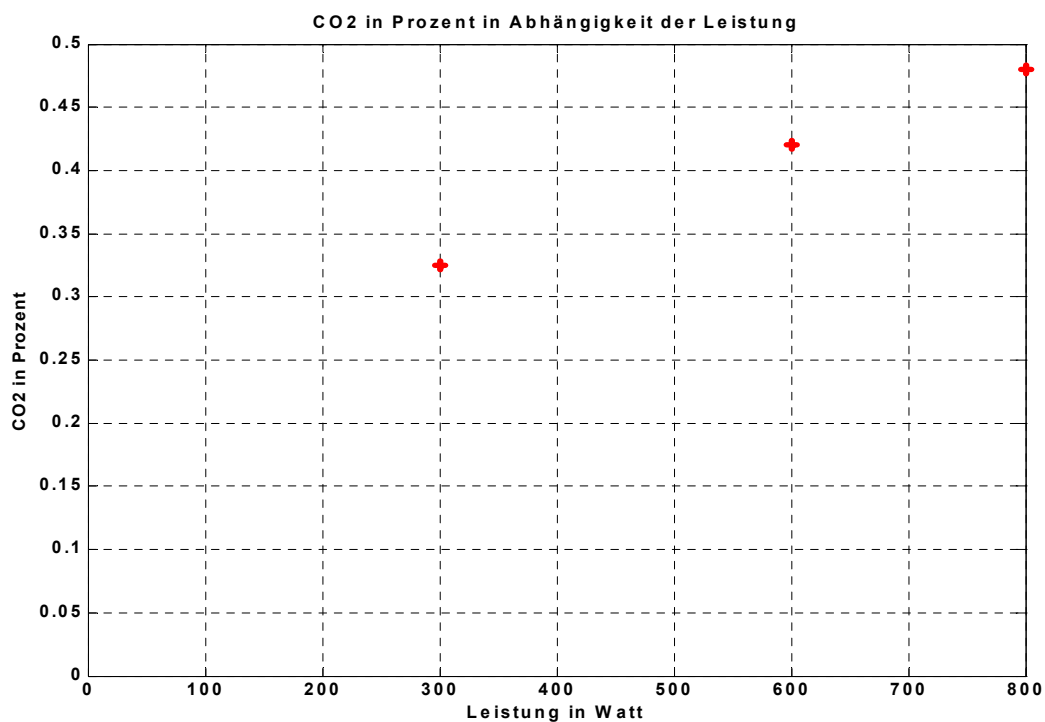


Abbildung 35 Kohlendioxidgehalt in Prozent in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.

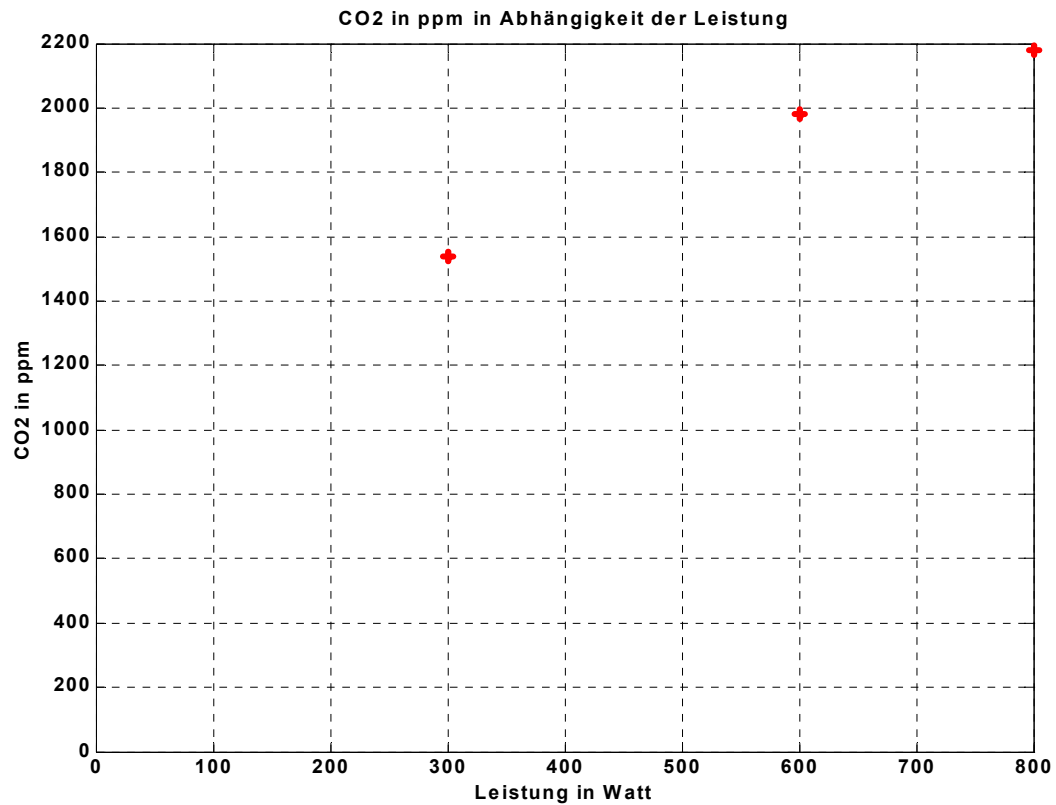


Abbildung 36 Kohlendioxidgehalt in ppm in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.

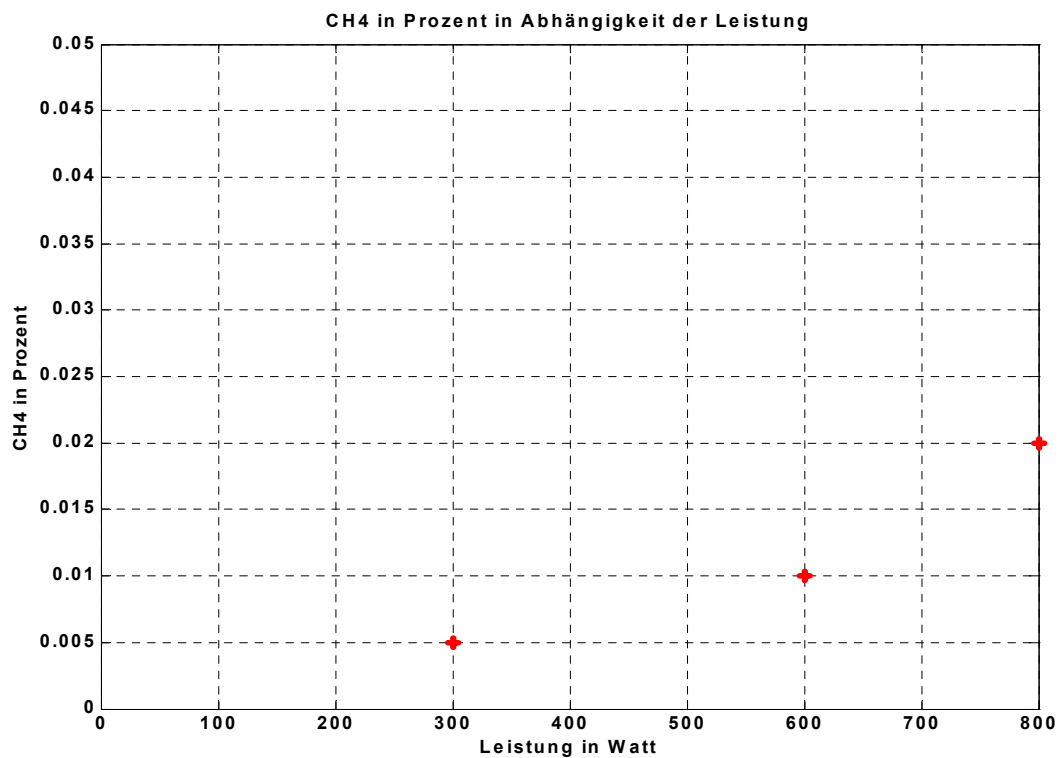


Abbildung 37 Methangehalt in Prozent in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.

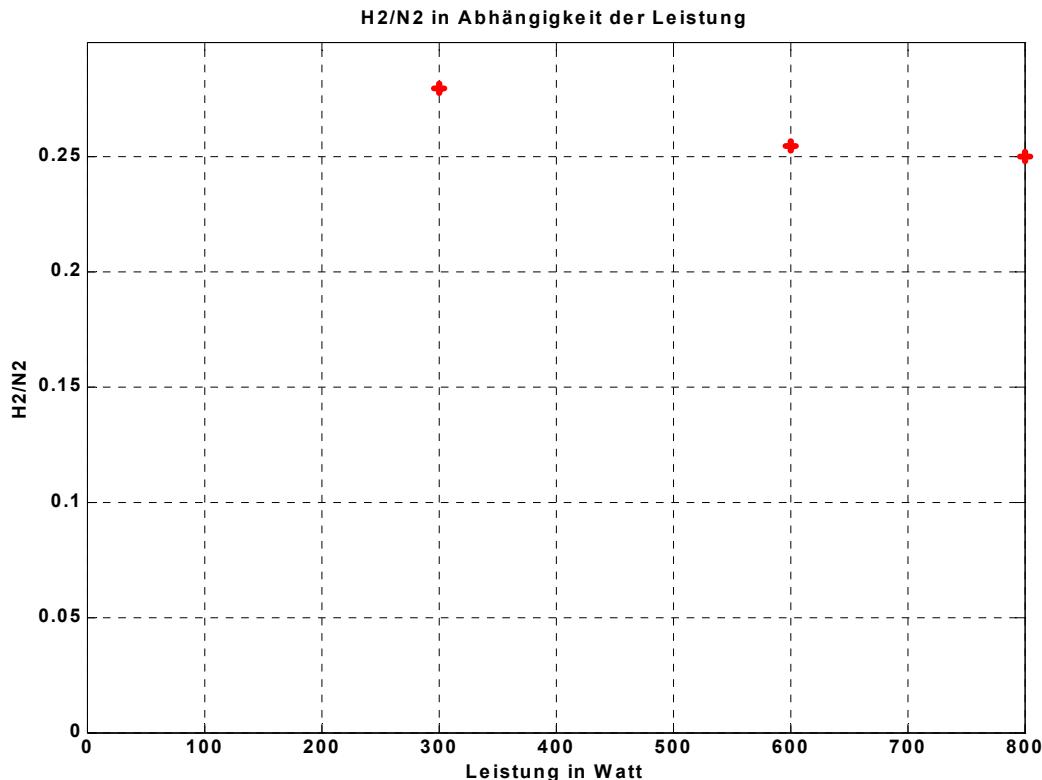


Abbildung 38 Wasserstoff-Stickstoffverhältnis in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.

Der Kohlendioxidgehalt in der Angabe von Prozenten (Abbildung 35) bzw. in ppm (Abbildung 36) zeigt eine Abhängigkeit von der am Ausgang des Wechselrichters angeschlossenen Last. Kohlendioxid hat keinen direkten schädlichen Einfluss auf den Menschen. Es versucht lediglich sich an Sauerstoffatomen anzubinden. Auf den Treibhauseffekt hat das Kohlendioxid aber eine große Auswirkung. Pflanzen sind in der Lage CO₂ und Wasser durch Photosynthese in Zucker und Sauerstoff umzuwandeln.

In Abbildung 37 sieht man das der Fuel Prozessor seine Aufgabe sehr gut erfüllt, da im Abgas des Systems kein Methanol nachgewiesen wird. Das bedeutet, das dieses verwendete Methanol-Wassergemisch, das dem Fuel Prozessor zugeführt wird, vollständig für die bereits beschriebene Produktion von Wasserstoff verwendet wird (Kapitel 4.2).

Bei der Reformierung im Fuel Prozessor entsteht ein Synthesegas das nach Gleichung 83



zusammengesetzt ist. Bei der Abtrennung des Wasserstoffes an der Palladiummembrane diffundiert nicht der gesamte Wasserstoff sondern es bleibt anscheinend ein geringer Teil davon übrig der sich in Abbildung 38 mit einem Wert von 0.25 % niederschlägt.

7.3.4 Zeitverhalten

Um die im Messprogramm angeführten Punkte (Analyse des Stack-Verhaltens, Degradation der Komponenten des Systems, Analyse von dynamischen Ereignissen im Inselbetrieb) untersuchen zu können, wurde dem System mit Hilfe einer Zeitschaltuhr in einem bestimmten Zeitabstand (z.B. alle 15 Minuten) eine Last aufgeschaltet. In den nachfolgenden Abbildung

39 bis Abbildung 42 werden einige markante Ausschnitte von diesen Lastsprüngen dargestellt.

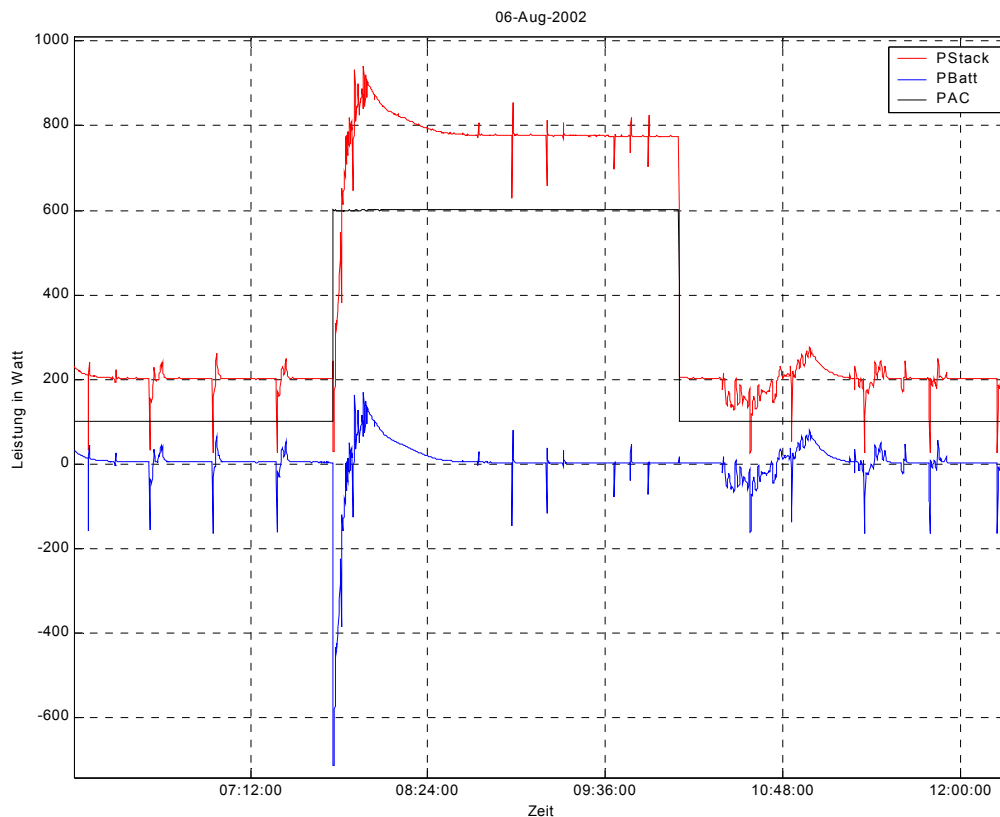


Abbildung 39 Lastsprung am 6. August 2002 von 100 auf 600 Watt. Auf der Ordinate ist die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.

Bei einem Sprung von 100 auf 600 Watt (Abbildung 39) liefert der Stack kurzfristig eine Leistung von 900 Watt. Die Pumpe zum Abführen des Reaktionsproduktes H_2O (dampf- und gasförmig) führt zu Leistungsschwankungen (negative und positive Spitzen im zeitlichen Abstand von ungefähr 20 bis 30 Sekunden, in der Kurve P_{Stack} nicht sehr deutlich ausgeprägt). Die Leistung in der Zeit, in der der Stack hochgefahren wird, liefert die Batterie. Dies erkennt man daran, dass der Rücken der Kurve P_{Stack} eine langsame Verflachung aufzeigt. In dieser Zeit wird die Batterie wieder aufgeladen. Mit den durchgeführten Messungen am System (stationäre, dynamische Verhältnisse) ist es möglich, dem Stack folgende Leistungsänderungsgeschwindigkeiten zuzuordnen: Bei Verbraucher bis ungefähr 400 Watt Leistung ergibt sich eine Leistungsänderungsgeschwindigkeit von durchschnittlich 6 Watt/min, bei Verbraucher von 500 Watt Leistung aufwärts ergibt sich eine Leistungsänderungsgeschwindigkeit von durchschnittlich 13 Watt/min.

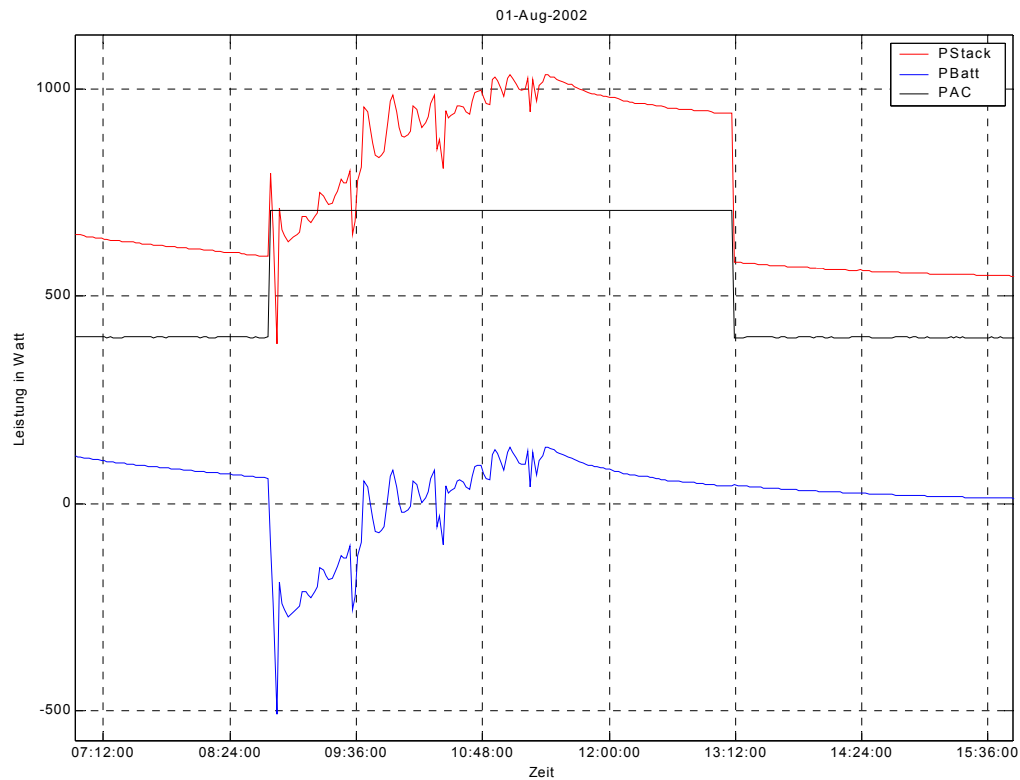


Abbildung 40 Lastsprung am 1. August 2002 von 400 auf 700 Watt. Auf der Ordinate ist die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.

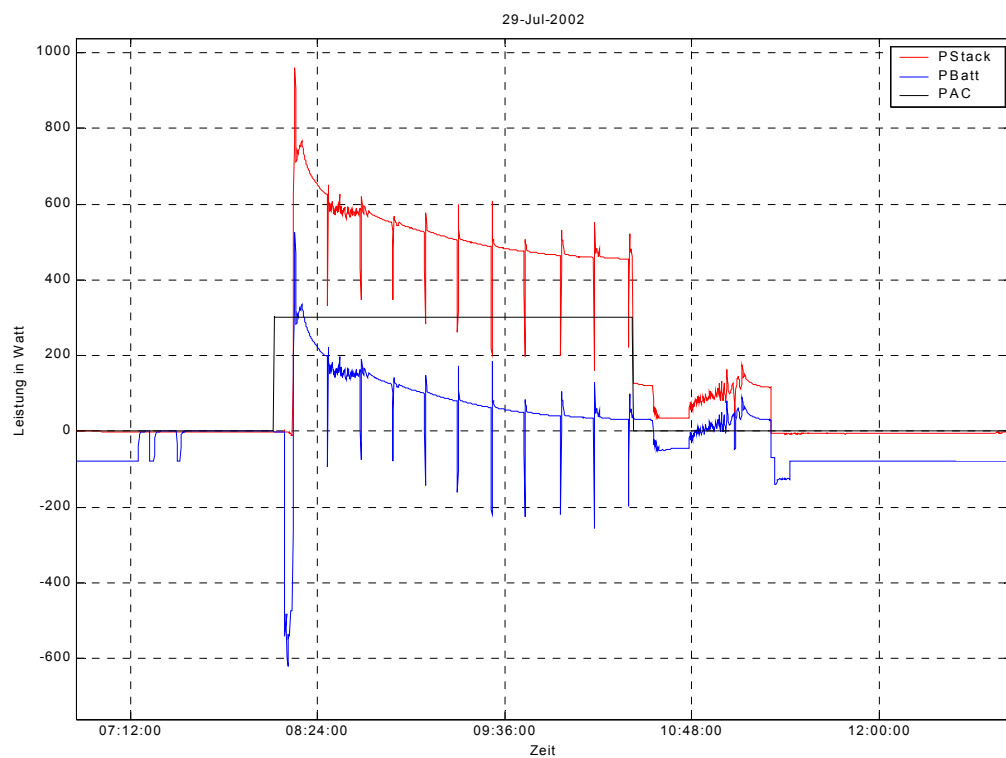


Abbildung 41 Lastsprung am 29. Juli 2002 von 0 auf 300 Watt. Auf der Ordinate ist die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.

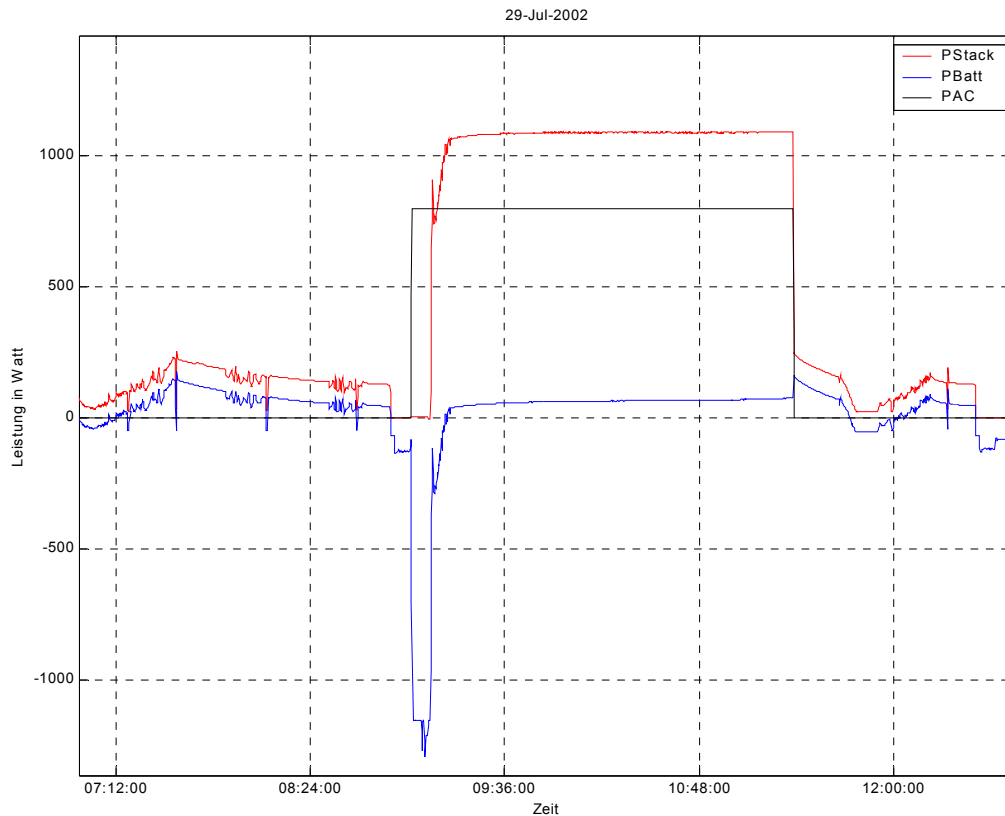


Abbildung 42 Lastsprung am 29. Juli 2002 von 0 auf 800 Watt. Auf der Ordinate ist die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.

In der Abbildung 41 wird die Leistung von 400 auf 700 Watt sprungartig erhöht. Der Verlauf der Leistung P_{Stack} macht deutlich, dass dieser Sprung eine große Belastung für die Brennstoffzelle selbst darstellt. In dieser Abbildung treten keine Leistungsspitzen der Kathodenwasserpumpe auf. In Abbildung 42 erfolgt ein Lastsprung von 0 auf 300 Watt. Die Kathodenwasserpumpe ist im Verlauf der Leistung P_{Stack} deutlich an den Leistungsspitzen erkennbar. Die benötigte Zusatzleistung im Augenblick der Zuschaltung der Pumpe wird von der Batterie zur Verfügung gestellt und nicht direkt vom Stack. Das FC System beginnt durchschnittlich erst nach ungefähr fünfzehn Minuten die Batterie mit einem Strom von 1.5 bis 4 Ampere wieder aufzuladen. Bei größeren Belastungen sinkt die Spannung schneller ab und dadurch erfolgt die Aufladung der Batterie früher. Insgesamt ist die Leistungsregelgeschwindigkeit des Systems sehr moderat ausgelegt. Bei stattfindenden Leistungsschwankungen werden diese vor allem zuerst von der Batterie abgepuffert.

Der Idle-Mode ist ein Zustand des Systems, in dem der gesamte Leistungsbezug der Systemkomponenten von der Batterie stammt. Der Stack wird abgeschaltet und erst beim Unterschreiten der Batteriespannung ($< 12.7 \text{ VDC}$ entspricht 90 % der Kapazität von der Batterie) „wacht“ dieser auf und lädt die Batterie. Dieses „Aufwachen“ ist in Abbildung 42 anhand der zeitlichen Verschiebung der beiden Leistungen P_{Stack} und P_{AC} sehr anschaulich dargestellt. Auch hier sind keine Leistungsspitzen, die durch die Kathodenwasserpumpe verursacht werden, sichtbar.

7.3.5 Modell

Die vorangegangenen Messungen wurden vor allem in der Absicht durchgeführt, ein Modell vom System entwerfen zu können. Nachdem von den Herstellern keine vertiefenden Informationen über die einzelnen Komponenten des Systems und ihres Zusammenwirkens zur Verfügung gestellt wurden, kann nur eine Nachbildung des Verhaltens des vorhandenen Systems, auf Basis der gemessenen Zeitverläufe bei unterschiedlichen Betriebszuständen erfolgen.

Bei der Nachbildung des Systems wurden die Wirkungsgradwerte von der Messung verwendet. Mit dem Programm Simulink wurde die Modellbildung durchgeführt, ein Überblick über das Modell wird in Abbildung 43 gegeben.

Es wurde versucht, die wesentlichen Blöcke des Systems zu erfassen. Da die Wasserstoffproduktion des Fuel Prozessors nicht gemessen werden konnte, wurde die Fuel Cell und der Fuel Prozessor als gemeinsamer Block angesehen. Der DC/DC-Konverter, die Batterie und der Wechselrichter sind die übrigen Blöcke.

Bei den Messungen wird das System bewusst in einem Betriebszustand mit konstanter Last und einem mit dynamischer Last betrieben.

Das Ziel sollte eine Vorgabe der Last am Ausgang des Wechselrichters sein um eine entsprechende Antwort vom Modell des System zu erhalten.

7.3.5.1 Beschreibung des Modells

Über die zeitliche Charakteristik der Hilfsaggregate kann keine Aussage getroffen werden. Es wurden keine Messungen an den Hilfsaggregaten durchgeführt und daher kann auch das zeitliche Verhalten dieser Komponenten in der Simulation nicht berücksichtigt werden.

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf das Modell in Abbildung 43. Die einzelnen Komponenten werden in der Reihenfolge von links nach rechts besprochen. Alle verwendeten Nutzungs- bzw. Wirkungsgrade stammen aus den Messungen am System.

Mit dem Block Step wird die gewünschte Leistung (zwischen 100 und 800 Watt) dem Modell vorgegeben. Diese Eingangsleistung wird mit dem Nutzungsgrad des Wechselrichters multipliziert und einem Summationsknoten zugeführt.

An diesem Summationsknoten wird die Leistung des Wechselrichters positiv und jene des DC/DC-Konverters negativ gezählt.

Am Ausgang dieses Knotens steht die Batterieleistung P_{Batt} zur Verfügung. Diese wird für die Nachbildung der Batterie verwendet. Der Batteriestrom wird aus dem Verhältnis von Batterieleistung zu Batteriespannung berechnet. Da die Kapazität der Batterie 42 Ah beträgt, wird der Strom von As in Ah umgerechnet. Der Batteriestrom wird nun aufintegriert (Gleichung 84). Als obere Integrationsgrenze wird der Wert 42 verwendet. Im Anschluss an dieser Integration befindet sich ein sogenannter Look-up Table. In diesem Look-up Table wird der Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung der Batterie mit Gleichung 85 nachgebildet¹⁹. Am Ausgang dieser Tables steht die Spannung der Batterie. Diese Batteriespannung wird für die Berechnung des Batteriestromes aus dem bereits erwähnten Verhältnis Batterieleistung zu Batteriespannung in Form einer Iteration verwendet.

$$Q = \int_0^T i(t) dt, \quad (84)$$

¹⁹ [9], Appendix B, Seite B1, Figure B-2: GENESIS state of charge

$$U(Q) = f(Q). \quad (85)$$

Damit die entladene Batterie wieder geladen werden kann, wird die aktuell berechnete Batteriespannung mit dem Wert der Spannung im aufgeladenen Zustand verglichen und bei einer entsprechenden Differenz wird am Ausgang des Blocks Relay, der das Verhalten eines Zweipunktreglers besitzt, eine Ladeleistung von 20 Watt ausgegeben. Diese Leistung wird dem Summationsknoten, der sich vor dem PID-Regler befindet, zugeführt, positiv gewichtet und somit der Batterieleistung mitaufaddiert. Die Ladeleistung wird dabei, auf Beobachtungen fußend, mit 20 Watt angenommen. Dies entspricht in etwa einen Strom von 1.5 Ampere.

Diese Summe der Leistungen wird dem PID-Regler, der den PID-Regler des Systems darstellen soll, zugeführt. Am Ausgang des PID-Reglers befindet sich zwecks besseren Regelverhaltens ein Begrenzungsblock (Saturation).

Der Fuel Processor wird mit seinem Übertragungsverhalten

$$G(s)_{FP} = \frac{0.033}{s + 0.033} \quad (86)$$

das von IdaTech bekannt gegeben wurde, charakterisiert. Anschließend folgt die Übertragungsfunktion der Brennstoffzelle mit

$$G(s)_{FC} = \frac{1}{50s + 1} \quad (87)$$

die anhand von Messungen bezüglich des zeitlichen Verhaltens des Systems gewonnen werden konnte. Dabei wurde angenommen, das der Einheitssprung bei einem Lastwechsel nach 5τ eingeschwungen ist. Der Rate Limiter folgt auf die Übertragungsfunktion der Brennstoffzelle. Dieser Block soll die leistungsmäßige Beschränkung des Systems bei größeren Lastsprüngen darstellen.

Die Ausgangsleistung des Systems wird mit dem Wirkungsgrad des Blocks Fuel Processor/Fuel Cell (Look-up Table nFPFC) und dem Wirkungsgrad des Blocks DC/DC-Konverter (Look-up Table nDC) multipliziert und dem Summationsknoten ganz links in der Abbildung 43 mit einem negativen Vorzeichen zugeführt.

Die Berechnung des Methanolkonsums erfolgt mit der Aufintegration der Leistung des Fuel Prozessors nach Gleichung 86. Mit dem Wissen das 1 Liter Brennstoff = 3117.84 Wh entsprechen und der Dauer der Simulationszeit in Sekunden kann auf die Menge des verbrauchten Methanol-Wassergemisches zurückgerechnet werden.

$$W = \int P(t) \cdot dt \quad (88)$$

SI-Einheit: Joule, 1 J = 1 Ws.

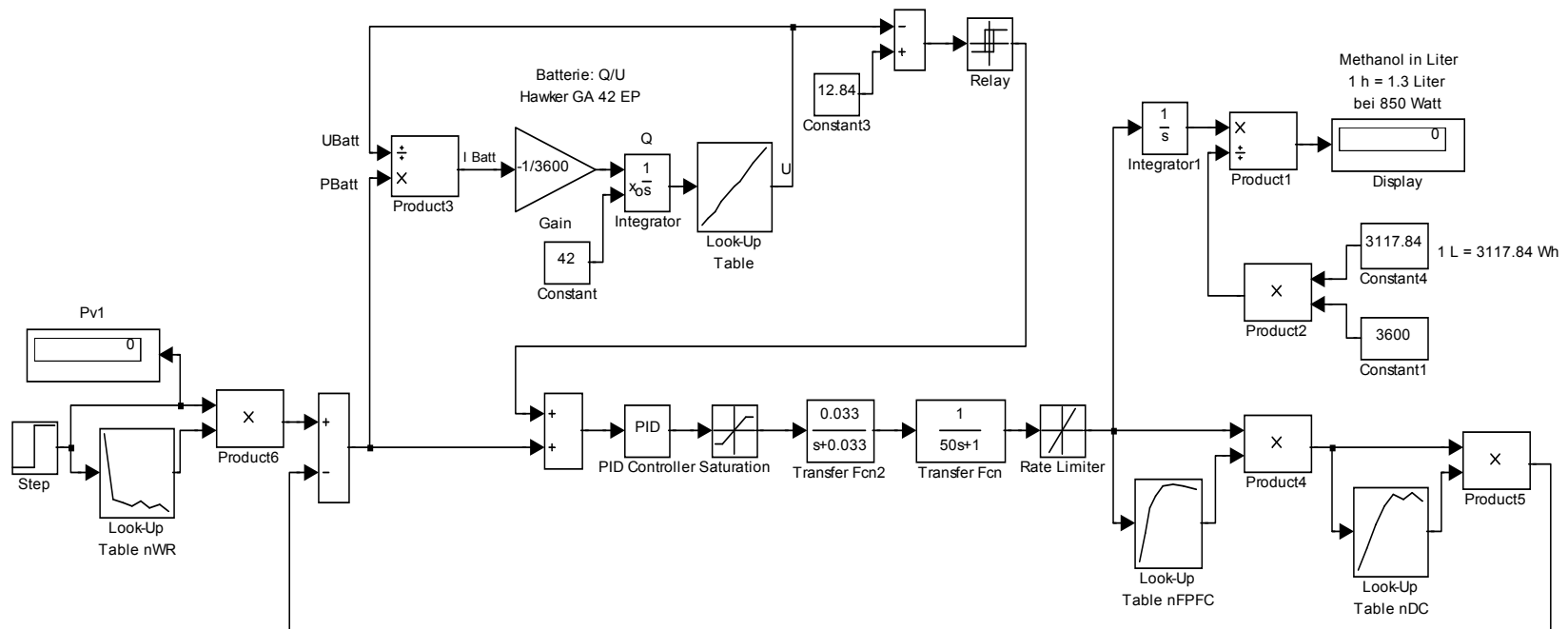


Abbildung43 Modell mit der Einbindung der Messwerte vom FC 1200 Systems.

7.3.5.2 Verwendung des Modells bei stationären Verhältnissen

Unter stationären Verhältnissen versteht man jene Verhältnisse, die sich nach dem aufschalten einer Last, wenn die dabei auftretenden Einschwingvorgänge abgeklungen sind, einstellen. Es gibt nach den Einschwingvorgängen keine Änderungen am Ausgang des Wechselrichters bezüglich der Last mehr.

Leistung	Verbrauch gem.	Verbrauch gem.	Verbrauch ger.	Verbrauch ger.	Fehler-Brennstoffverbrauch
Watt	Liter/h	kWh/h	Liter/h	kWh/h	%
100	0,373	1,163	0,381	1,188	-2,1
200	0,448	1,397	0,449	1,400	-0,2
300	0,519	1,618	0,509	1,587	1,9
400	0,604	1,883	0,589	1,836	2,5
500	0,635	1,980	0,672	2,095	-5,8
600	0,753	2,348	0,796	2,482	-5,7
700	0,920	2,868	0,938	2,925	-2,0
800	1,068	3,330	1,097	3,420	-2,7
850	1,300	4,053	1,189	3,707	8,5

Tabelle 14 Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Werte anhand der Verbrauchswerte des Methanol-Wassergemisches bei stationären Verhältnissen. Die letzte Zeile bezieht sich auf die Normvorgabe des Herstellers, das in einer Stunde bei 850 Watt 1.3 Liter vom Methanol-Wassergemisch verbraucht wird. 1 Liter Brennstoff = 3117.84 Wh.

Vergleicht man die Werte in Tabelle 14 so bemerkt man das die Abweichungen der gerechneten von den gemessenen Werten maximal neun Prozent betragen. Der Ablesefehler (Ablesen des Füllstandes des Methanol-Wassergemisches am Tank), der nicht beziffert werden kann, ist in dem in Tabelle 14 angeführten Fehler noch enthalten. Auch auf die Schwankungen der gemessenen Wirkungsgrade und den dafür angeführten Ursachen ist Bedacht zu nehmen. Die angeführten Verbrauchswerte sind in unterschiedlichen Zeiteinheiten erfasst worden, die Rechenzeit entspricht der Messzeit (Tabelle 14 und Tabelle 15).

$$\text{Formel für Fehlerermittlung F: } F = \left(\frac{Q_{gem} - Q_{ger}}{Q_{gem}} \cdot 100 \right) \quad (89)$$

Q: Methanolverbrauch in Liter pro Stunde

7.3.5.3 Verwendung des Modells bei dynamischen Verhältnissen

Bei den dynamischen Verhältnissen werden alle fünfzehn Minuten am Ausgang des Wechselrichters die Lastverhältnisse mit Hilfe einer Zeitschaltuhr sprunghaft geändert.

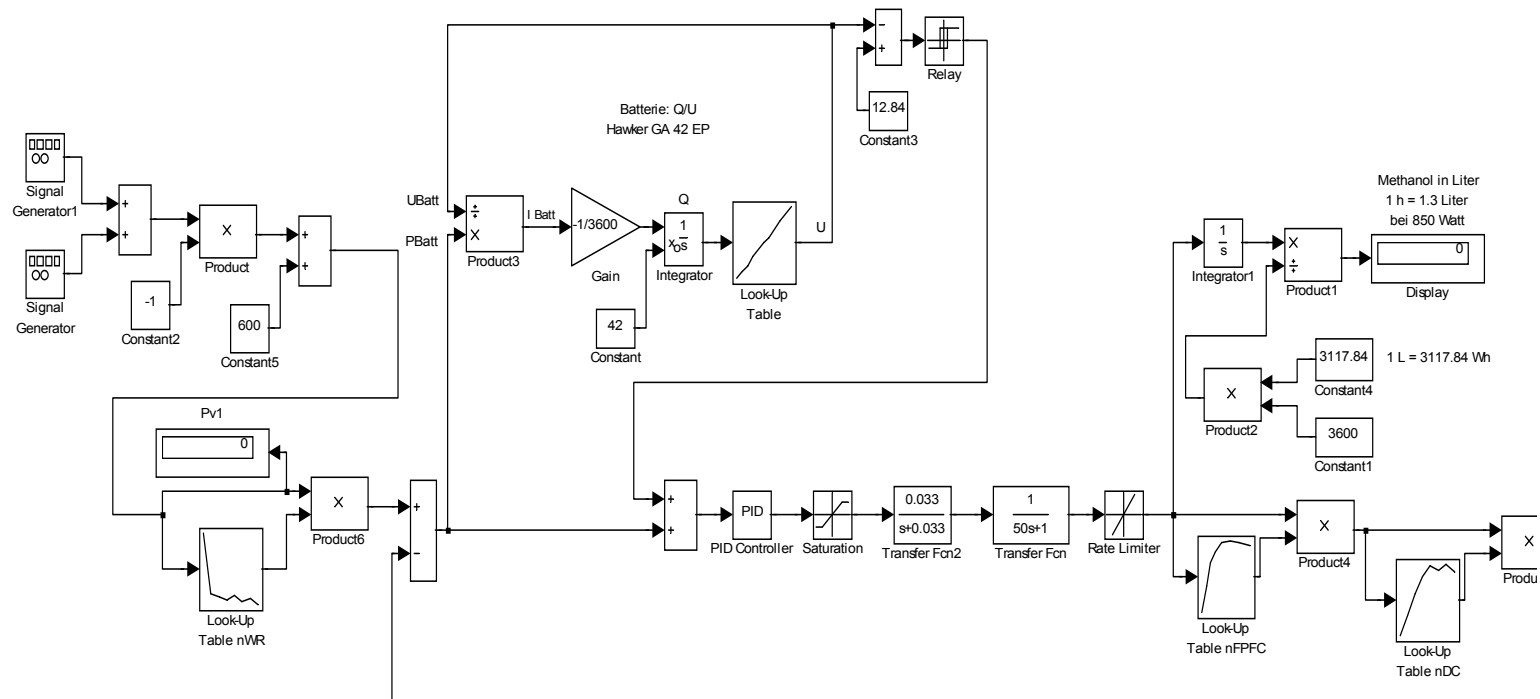


Abbildung 44 Modell zur Nachbildung der dynamischen Verhältnisse bei einem Lastsprung von 300 auf 500 Watt am Ausgang des Wechselrichters des FC 1200 Systems. Die Blöcke links oben in der Abbildung 44 dienen zur Nachbildung einer dynamischen Last. Zur Nachbildung einer dynamischen Last wird eine Sprungfunktion erzeugt, die die zeitlichen und amplitudenmäßigen Änderungen der Last am Ausgang des Wechselrichters nachvollzieht.

Leistung Watt	Verbrauch gem. Liter/h	Verbrauch gem. kWh/h	Verbrauch ger. Liter/h	Verbrauch ger. kWh/h	Fehler-Brennstoffverbrauch %
200⇔400	0,542	1,690	0,526	1,640	3,0
300⇔500	0,604	1,883	0,590	1,840	2,3
500⇔700	0,851	2,653	0,827	2,578	2,8

Tabelle 15 Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Werte anhand der Verbrauchswerte des Methanol-Wassergemisches bei dynamischen Verhältnissen.

In Tabelle 15 erhält man einen Überblick über die Verbrauchswerte des Methanol-Wassergemisches bei dynamischen Verhältnissen. Die mit Hilfe des Modells berechneten Werte und jene, die von der Tankskala abgelesen wurden, werden miteinander verglichen und daraus der Fehler berechnet. Man erkennt dass der Fehler in etwa in einem Bereich von unter vier Prozent liegt.

Formel für Fehlerermittlung F:

$$F = \left(\frac{Q_{gem} - Q_{ger}}{Q_{gem}} \cdot 100 \right) \quad (90)$$

Q: Methanolverbrauch in Liter pro Stunde

7.3.5.4 Analyse des Modells für konstante Verhältnisse

Das Messprogramm MessungDewetron32 (Lab View) ermittelt die Schein- und Wirkleistung nach folgenden Gleichungen:

$$P = \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt, \quad (91)$$

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 \cdot dt}, \quad (92)$$

$$S = U_{eff} \cdot I_{eff}, \quad (93)$$

$$\text{Gleichwert (linearer arith. MW)} \quad \bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot dt. \quad (94)$$

In Abbildung 45 wird ein Überblick über die Messwertverarbeitung gegeben. Von den Messwerten wird zuerst der jeweilige Effektivwert (RMS) von Strom und Spannung nach Gleichung 90 gebildet. Die Wirkleistung P in Gleichung 89 ist das Produkt aus den Spannungs- und Strommesswerten mit anschließender Mittelwert (µx-Mean) Berechnung. Die Scheinleistung S in Gleichung 91 ist das Produkt von den Effektivwerten aus Strom und Spannung. Die Mittelwerte für Strom und Spannung nach Gleichung 92 werden für die Bestimmung des Wechselanteils des Batteriestromes gebildet.

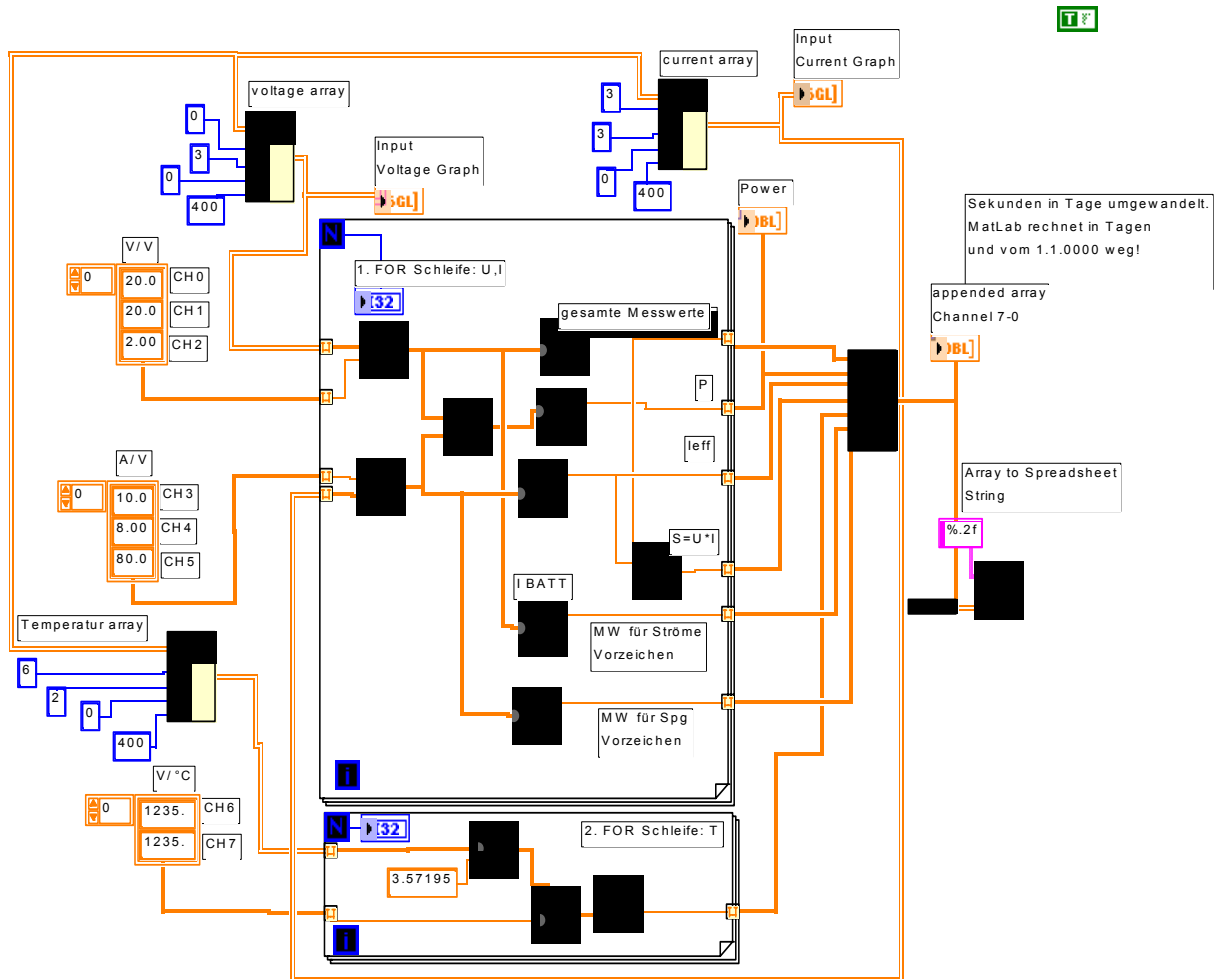


Abbildung 45 Einlesen und Berechnung der Messwerte im Programm MessungDewetron32 (Lab View, Ausschnitt aus der Messverarbeitungskette).

Als Beispiel für den Vergleich der Messwertkurven mit denen des Modells wird eine Wirkungsgradmessung von 500 Watt Last, die am 29.8.002 durchgeführt wurde, verwendet (Abbildung 46). Die Messwerte werden, um die zeitlichen Verläufe der Leistungen besser darstellen zu können, in den Abbildungen entsprechend vergrößert. Die Simulationszeit des Modells beträgt 11340 Sekunden und entspricht damit der Messzeit am System für diese Wirkungsgradaufnahme.

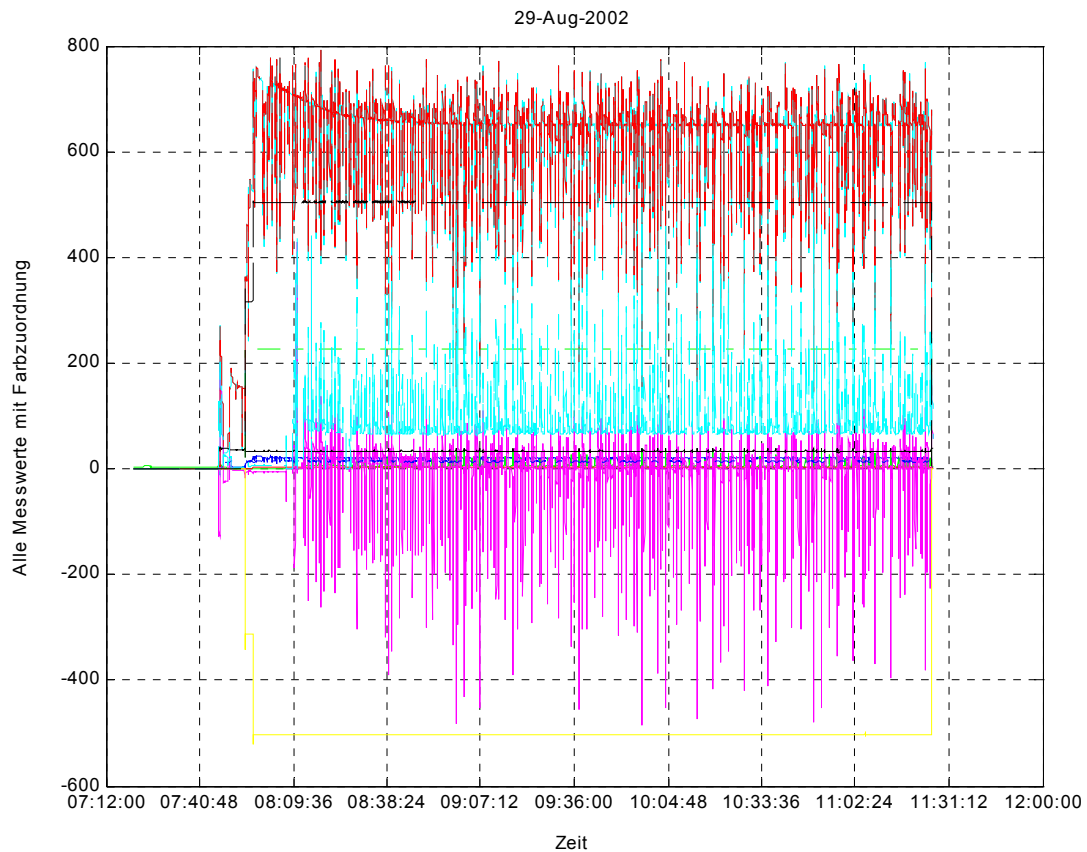


Abbildung 46 Wirkungsgradmessung 500 Watt. Überblick über die gemessenen Leistungen von S_{AC} , P_{AC} , P_{Batt} , S_{Stack} , P_{Stack} . Auf der Ordinate wird die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.

Batterie

Bei der 500 Watt WG-Messung sind 5 Ampere konstant und Spitzenwerte bis zu 33 Ampere zu verzeichnen (Abbildung 47, grün). Es wird ein Gleichstrom von der Batterie erwartet. Die Messwerte zeigen aber einen Wechselstromanteil an. Stromspitzen in die negative Richtung als Zeichen der Entladung der Batterie fehlen. Der Batteriestrom im Modell (Abbildung 48) hat im eingeschwungenen Zustand Null Ampere. Am Anfang steigt der Batteriestrom im Modell von -50 auf +8 Ampere. Die Batterie wird also kurzfristig entladen und anschließend aufgeladen. Innerhalb von 1500 Sekunden nimmt der Ladestrom ab und pendelt sich um den Nullpunkt ein. Das Modell braucht also 1500 Sekunden um die Stackleistung von anfangs Null Watt auf die geforderte Leistung von 500 Watt zu steigern.

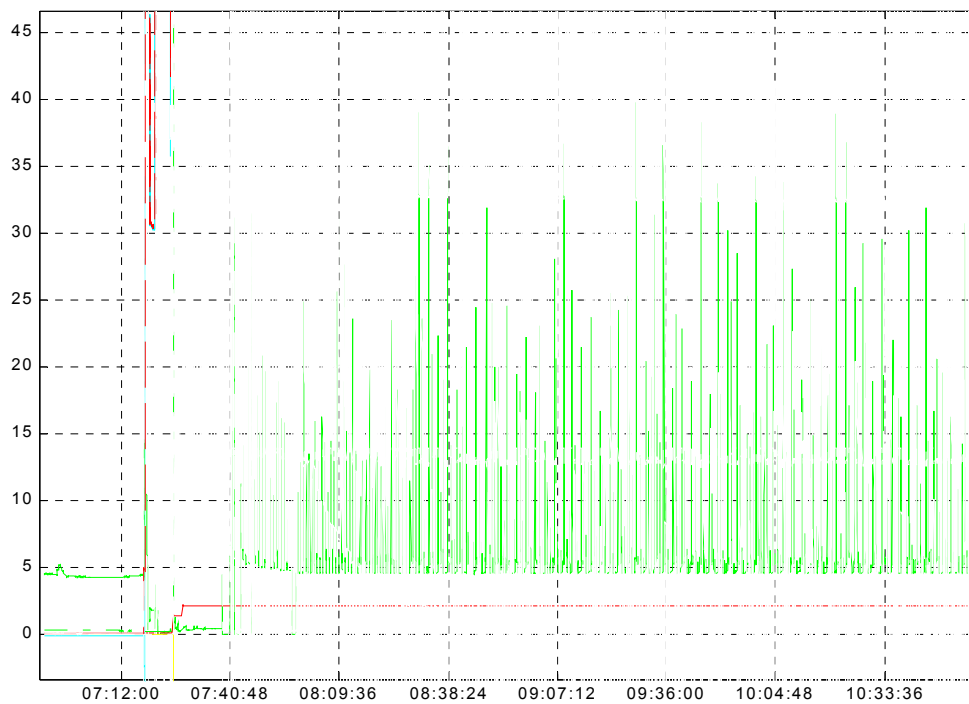


Abbildung 47 Verlauf des Batteriestromes I_4 (grün) über der Zeit bei Wirkungsgradmessung 500 Watt. Auf der Ordinate ist der Strom in Ampere aufgetragen und auf der Abszisse die Zeit.

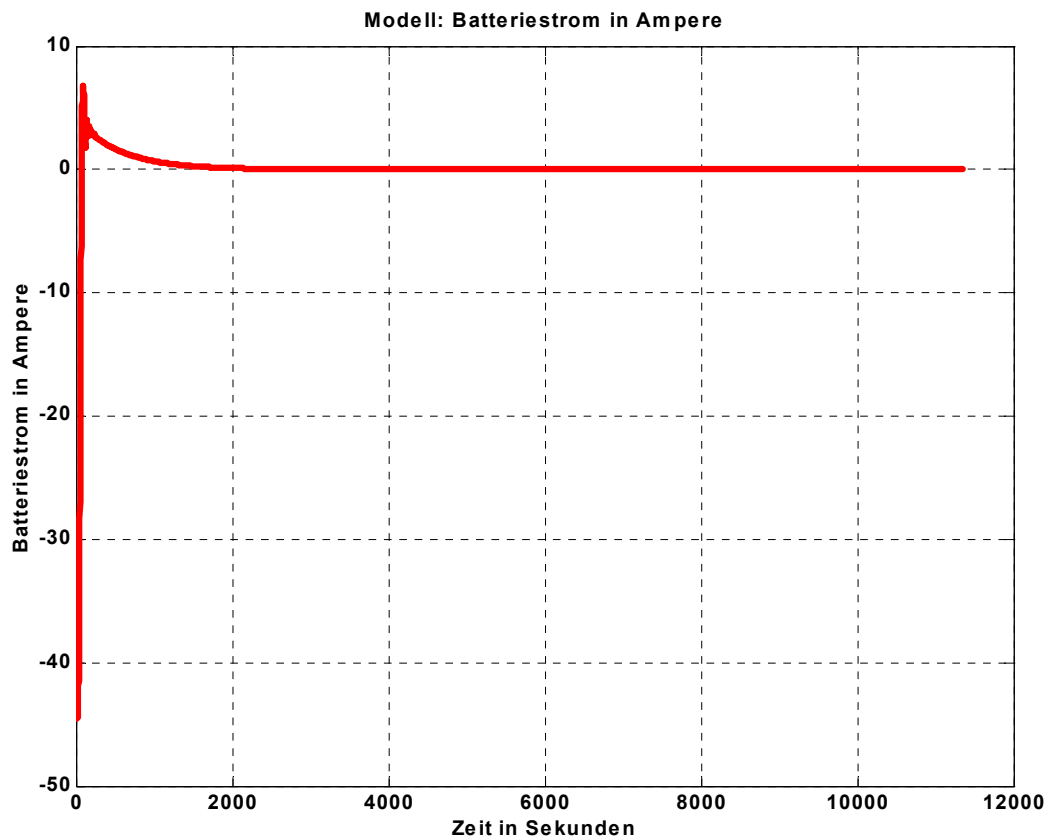


Abbildung 48 Der Batteriestrom I_4 in Ampere vom Modell berechnet wird über die Zeit in Sekunden aufgetragen.

Da die Wirkleistung P_{Batt} der Batterie (Abbildung 49, violett) wie bereits eingangs erwähnt nach Gleichung 89 ermittelt wird, fällt der Wechselstromanteil dabei heraus. In Abbildung 50 (Modell) wird die Batterie zuerst entladen und anschließend vom System wieder geladen. Der Ladevorgang wird dabei innerhalb von 1500 Sekunden durchgeführt. Der Verlauf der Leistung entspricht dem vom Strom in Abbildung 48 wobei um die Leistung zu erhalten zusätzlich noch mit der entsprechenden Batteriespannung multipliziert werden muss.



Abbildung 49 Verlauf der Batterieleistung P_{Batt} (violett) über der Zeit. Auf der Ordinate wird die Leistung in Watt angegeben und auf der Abszisse die Zeit.

Die Arbeitsweise des Systems besteht darin die Batterie als einen Zwischenpuffer zu benutzen, der, nachdem eine bestimmte Energiemenge entnommen wurde, wieder aufgefüllt wird. Die positiven Ausschläge bedeuten das die Batterie gerade aufgeladen, die negativen das sie gerade entladen wird. Diese Ausschläge sind nur in den Abbildungen der Messwerte vom System sichtbar, da wie bereits eingangs erwähnt das zeitliche Verhalten der Hilfsaggregate des Systems mit dem Modell nicht nachgebildet wird (vgl. 7.3.5.1 Beschreibung des Modells).

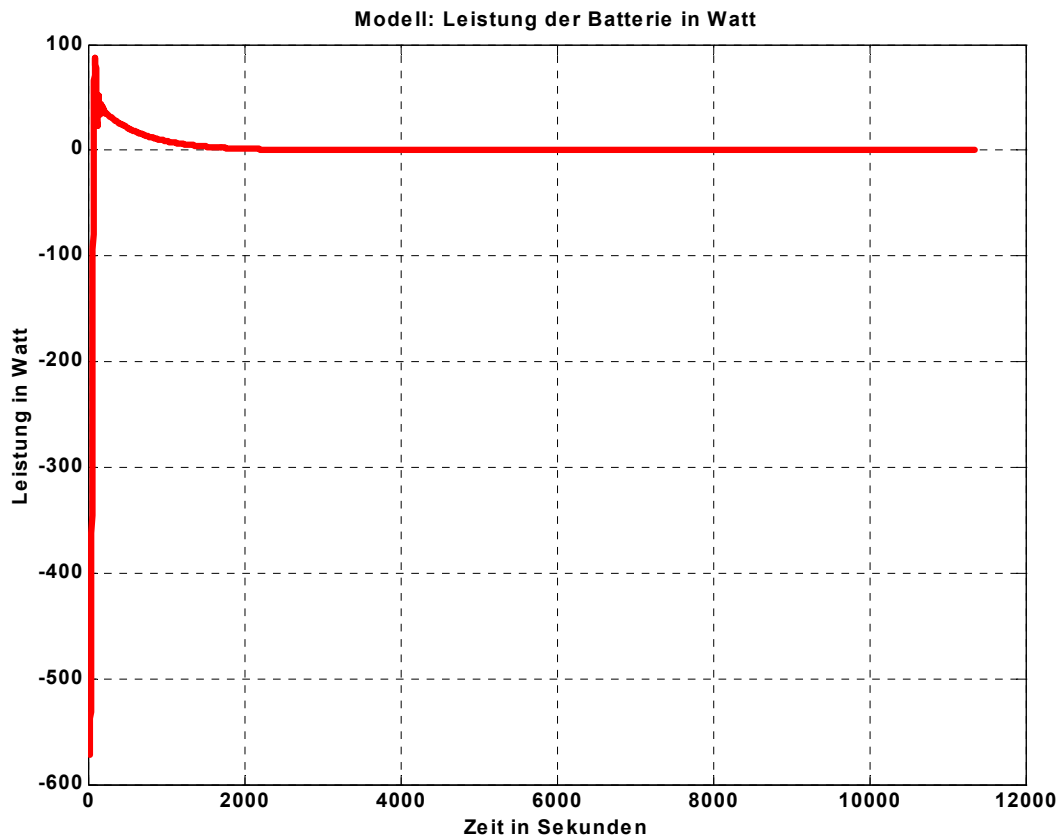


Abbildung 50 Die Leistung der Batterie in Watt vom Modell berechnet wird über die Zeit in Sekunden aufgetragen.

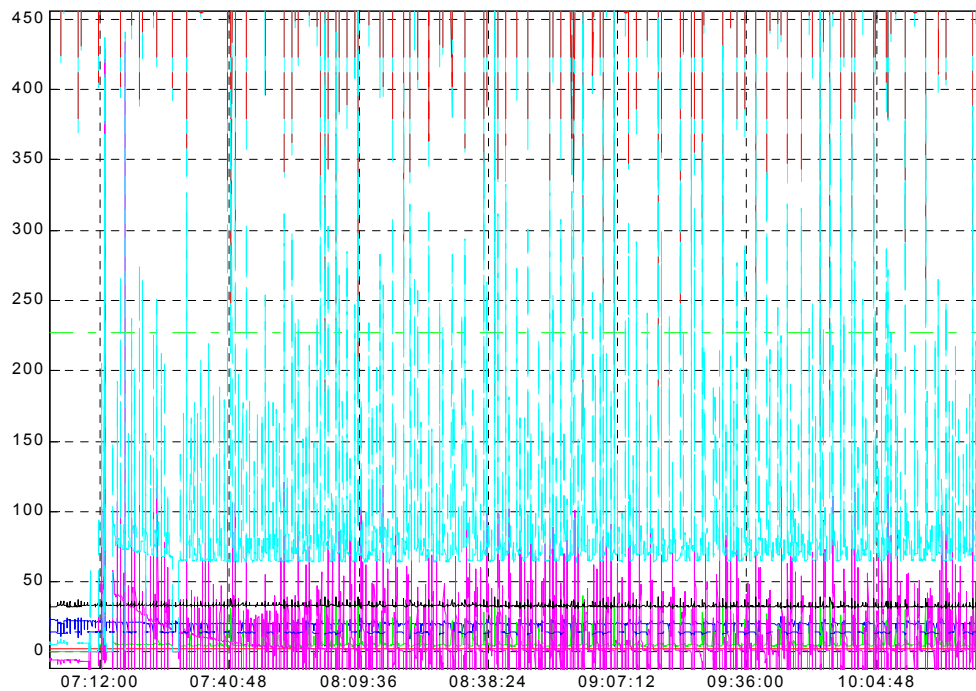


Abbildung 51 Verlauf der Scheinleistung S_{Batt} der Batterie (S_{Batt} , türkis). Auf der Ordinate wird die Leistung in Watt angegeben und auf der Abszisse die Zeit.

Für die Herkunft des Wechselstromanteils wären zwei Erklärungen plausibel. Die eine wäre das der DC/DC-Konverter, der die variable Stackspannung in eine konstante Gleichspannung umwandelt seine Taktfrequenz, die vermutlich in einem Bereich von einigen kHz liegt, seinem Ausgangsstrom aufprägt. Eine andere Erklärung wäre das der Wechselrichter, der seinen Umrichtungsprozess mit Hochfrequenz-Schalttechnologie durchführt, seinerseits eine Frequenz dem Gleichstrom aufmoduliert. Da es keine Beschreibungen seitens der Hersteller über das Arbeitsprinzip dieser beiden Bauteile gibt kann man an dieser Stelle keine genaueren Aussagen darüber treffen.

Der Stromverlauf der Batterie wurde im Modell als ein reiner Gleichstrom interpretiert. Das Auftreten des Wechselstromanteils hängt sicherlich mit den verwendeten Baugruppen Wechselrichter bzw. DC/DC-Konverter zusammen und dürfte in diesem Zusammenhang als eine Begleiterscheinung betrachtet werden. Da diese Erscheinung keinen negativen Effekt auf die Batterie oder sonstige Module hat erscheint es auch nicht notwendig sie ins Modell zu übertragen.

Fuel Prozessor/Fuel Cell

In Abbildung 52 wird der Verlauf der Stackleistung (S_{Stack} , rot; P_{Stack} , türkis) über der Zeit (7 Uhr bis 10 Uhr) dargestellt. Von anfangs 750 Watt sinkt diese nach dem Aufladen der Batterie auf etwa 650 Watt ab. Durch die stattfindenden Ein- und Ausschaltvorgängen der Pumpen und Lüfter und den dadurch bedingten Leistungsbedarf werden die Schwankungen verursacht.

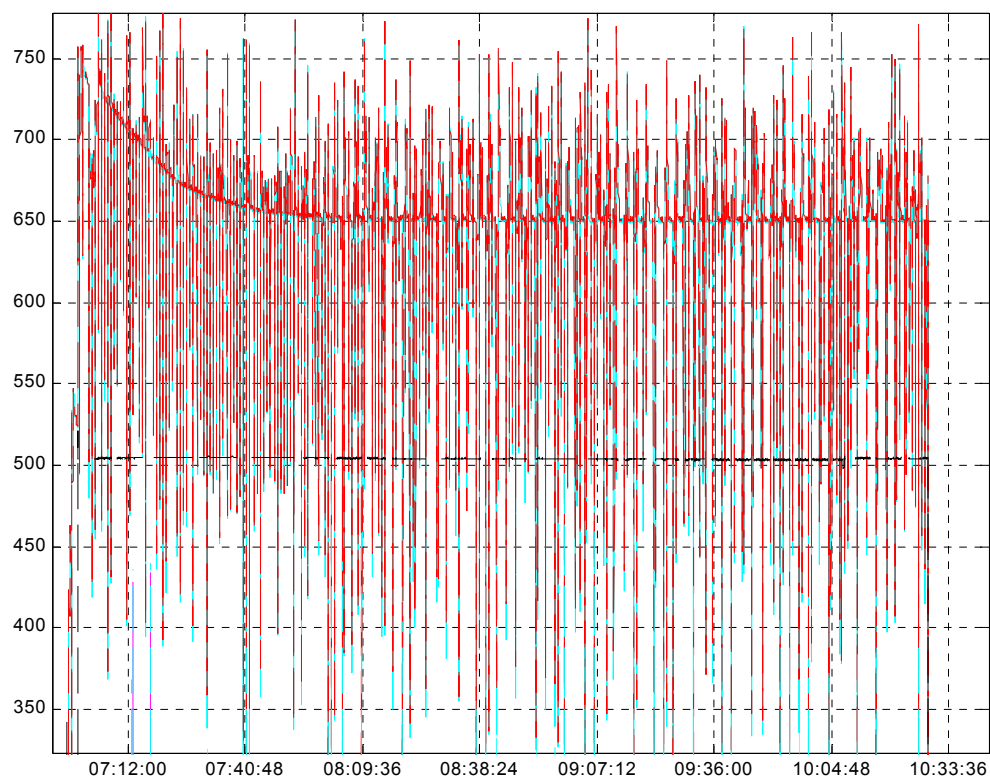


Abbildung 52 Verlauf der Stackleistung (S_{Stack} , rot; P_{Stack} , türkis; deckungsgleich) über die Zeit bei einer Wirkungsgradmessung von 500 Watt.

Vergleicht man nun Abbildung 52 mit den Werten die vom Modell in Abbildung 53 berechnet wurden so stimmt die Charakteristik mit dem sprunghaften Ansteigen und dem Absinken der

Leistung gut überein. Beim Modell wird ein maximaler Anfangswert von ungefähr 770 Watt erreicht der sich nach dem Aufladen der Batterie bei ungefähr 650 Watt einstellt. Das Absinken der Stackleistung auf einen mittleren Wert von 650 Watt dauert beim System ungefähr eine Stunde, beim Modell jedoch nur ungefähr 20 Minuten. Die Leistungsspitzen sind beim Modell nicht vorhanden.

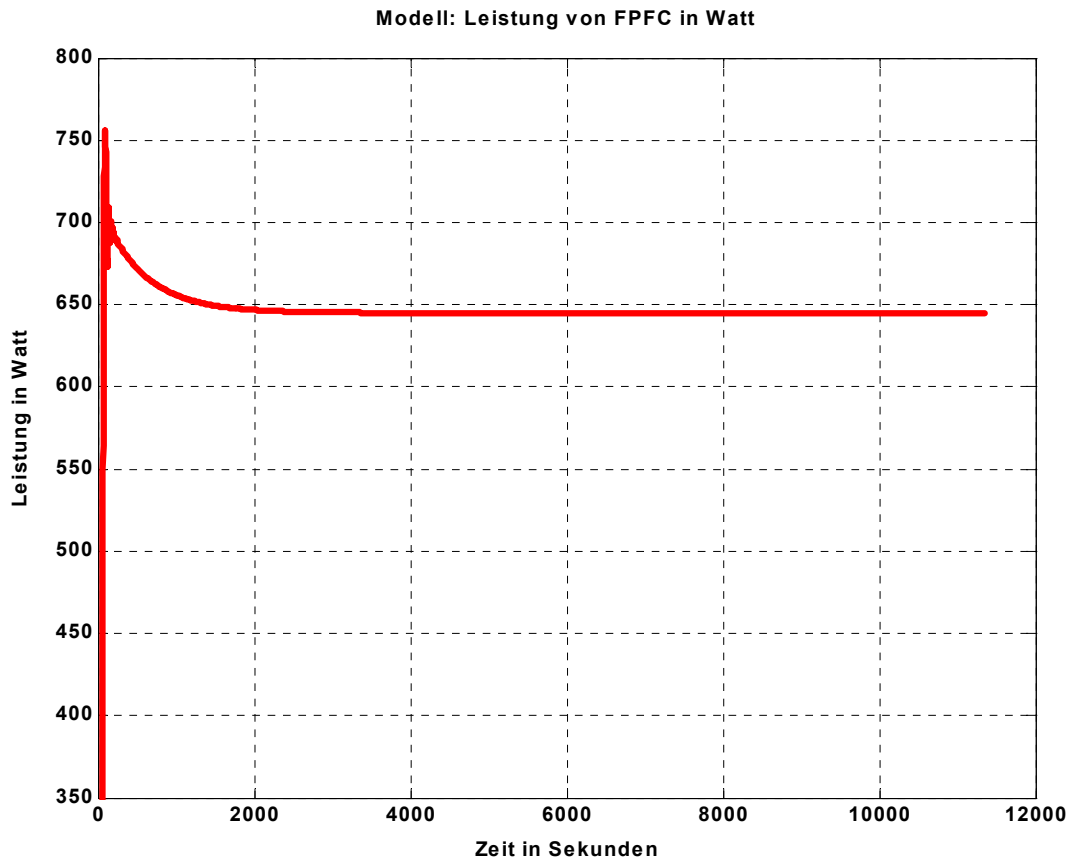


Abbildung 53 Die Leistung des Blocks Fuel Prozessor/Fuel Cell P_{FPFC} in Watt vom Modell berechnet wird über die Zeit in Sekunden aufgetragen.

Die Zeitkonstanten für das Einschwingen des Systems sind unterschiedlich. Im ersten Moment der Belastung wird die benötigte Leistung vollständig von der Batterie bezogen und erst nach ungefähr 60 bis 120 Sekunden reagiert das System darauf und beginnt mit einer Erhöhung der Stackleistung (Beobachtung) die sich langsam sukzessive der benötigten Leistung (von der Last vorgegeben) annähert und zusätzlich noch die Leistung, die zum Aufladen der Batterie benötigt wird, liefert. Der maximale Anfangswert wie auch der stationäre Wert für die Leistung sind im Modell recht gut nachgebildet.

DC/DC-Konverter

Beim Modell in der Abbildung 54 wird ein Leistungssprung auf P_{DC} 650 Watt verzeichnet, nach dem Einschwingen wird ein Wert von 560 Watt erreicht.

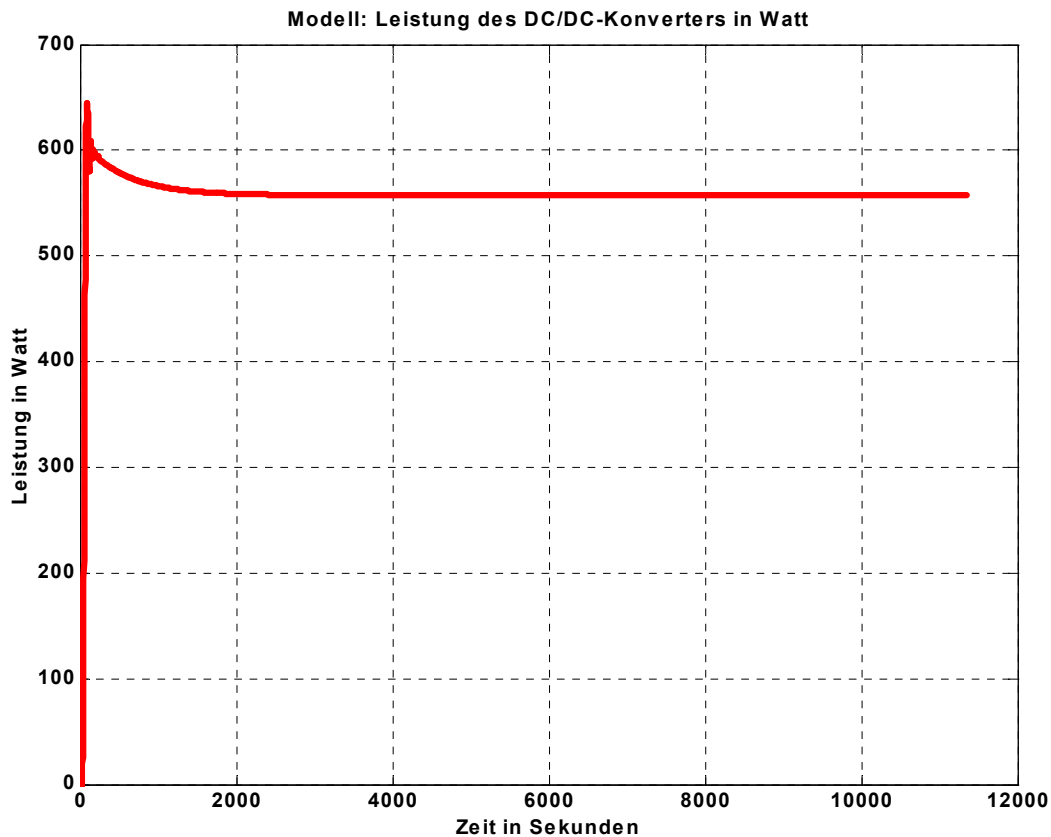


Abbildung 54 Die Leistung des Blocks DC/DC-Konverters P_{DC} in Watt vom Modell berechnet wird über die Zeit in Sekunden aufgetragen.

Die Leistung des DC/DC-Konverters wurde nicht explizit aufgenommen. Es wurde nur die Spannung U_2 am Ausgang erfasst. Der Strom wurde nur bei jedem Messpunkt in der Mitschrift der Messwerte mitnotiert. Da die Batterie, die als Zwischenpuffer benutzt wird, ständig vom System aufgeladen und entladen wird, dürfte der zeitliche Verlauf der Leistung P_{DC} der von der Batterie S_{DC} entsprechen. Der mitnotierte Strom I_3 beträgt beim gewählten Beispiel um die 40 Ampere. Dies ergibt eine Leistung von

$$P = U_2 \cdot I_3 = 14VDC \cdot 40ADC = 560Watt. \quad (95)$$

Die im Modell berechnete Leistung P_{DC} beträgt 560 Watt und hat Leistungsspitzen zwischen 530 und 640 Watt.

Wechselrichter

Der Wechselrichter liefert an seinem Ausgang immer die von der Last benötigte Leistung. Diese Leistung ist konstant. Bei Lastsprüngen wird die benötigte Augenblicksleistung von der Batterie bezogen, die nach der Reaktionszeit des Gesamtsystems von der Fuel Cell wieder aufgeladen wird. Wird das System überlastet, so wird die fehlende Differenzleistung von der Batterie bezogen. Nach Erreichen der Hälfte der Batteriekapazität (42 Ah) schaltet sich das System automatisch ab (Shut-down) um sich selbst in die Lage versetzen zu können noch einmal ohne Hilfe hochfahren zu können. Wenn die Batterie leer ist, kann das System nicht mehr hochgefahren werden da dreißig Minuten benötigt werden um den Fuel Prozessor zu starten und um ausreichend Wasserstoff zu produzieren. Nach diesen dreißig Minuten wird anschließend zuerst die Batterie aufgeladen.

7.3.5.5 Analyse des Modells für dynamische Verhältnisse

Vergleicht man die Fehler von den stationären und den dynamischen Modellberechnungen (Tabelle 14 und Tabelle 15), so stellt man folgendes fest:

In der ersten Zeile in Tabelle 15, beim Lastsprung von 200 auf 400 Watt beträgt der Fehler 3%. Vergleicht man diesen mit dem Fehler von 300 Watt in Tabelle 14 so beträgt dieser 1.9%. Beim Lastsprung von 300 auf 500 Watt beträgt der Fehler 2.3% im Vergleich zu 400 Watt mit 2.5% Fehler. Der größte Fehler mit einem Wert von 8.5% ergibt sich beim Vergleich des Lastsprunges von 500 auf 700 Watt mit 2.8% im Vergleich zum Fehler in Tabelle 14 bei 600 Watt mit –5.7%.

Bei den Lastsprüngen im Modell wurde die Anzahl der Schaltimpulse als auch der Ausgangs- wie Endzustand bereits berücksichtigt. Um die Abweichung im Modell zwischen stationären und dynamischen Verhältnissen am Lastsprung von 500 auf 700 Watt besser verstehen zu können, wurde dieser einer genaueren Analyse unterzogen.

In der Abbildung 55 wird auf die zusätzlichen Modifikationen im Vergleich zur Abbildung 44 hingewiesen.

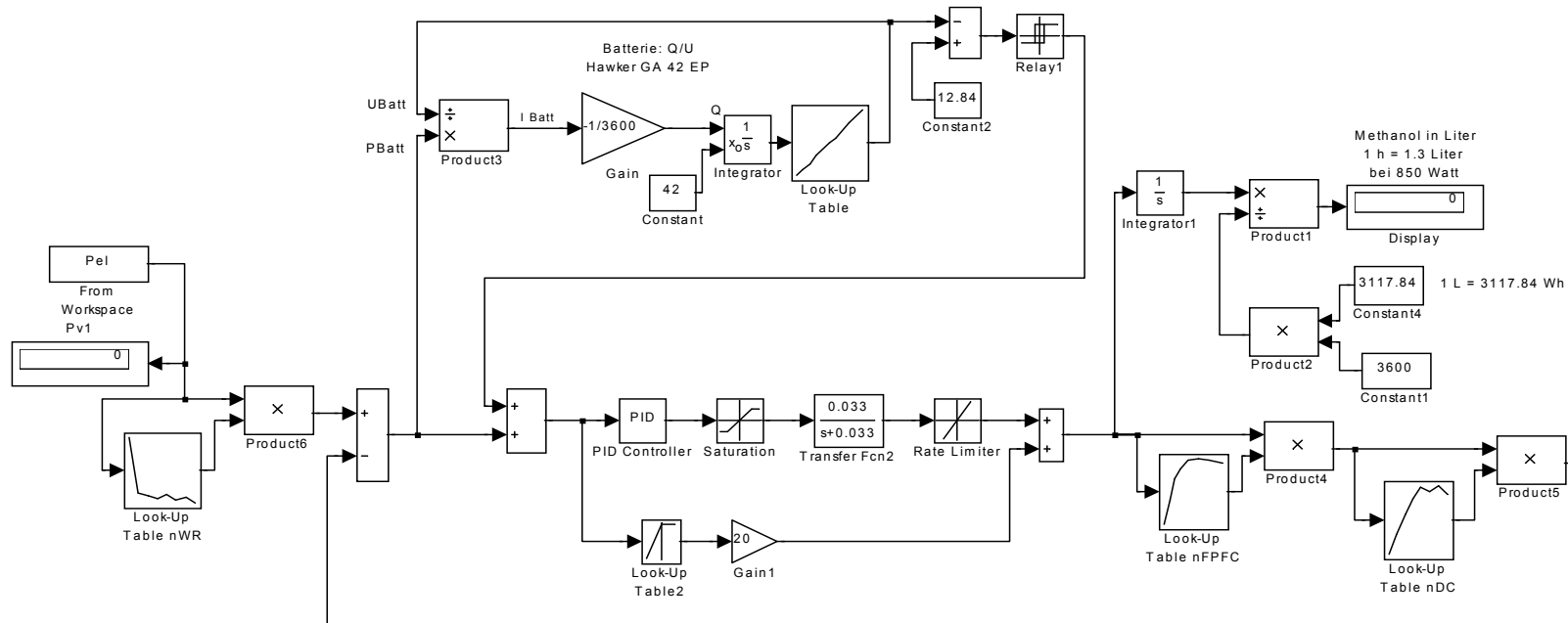


Abbildung 55 Modell für die Nachbildung des Lastsprunges von 500 auf 700 Watt in einem 15-Minuten-Intervall.

Es wird in Abbildung 55 nur noch das Zeitverhalten des Fuel Prozessors berücksichtigt. Vor dem PID-Regler wird das Eingangssignal zusätzlich einem Look-up Table zugeführt. Dieser soll nur die negativen Impulse des Signals „durchlassen“. Anschließend erfolgt eine Gewichtung, so dass jeder negative Impuls um den Faktor 20 verstärkt wird. Dieses gewichtete Signal wird dem Regelsignal am Ausgang des Rate Limiter zugeführt.

Die Sprungfunktion wird nicht mehr mit Hilfe von zwei Signalgeneratoren erzeugt, sondern direkt anhand der Messwerte nachgebildet (Programm Sprungfunktion bildet P_{el} nach). Damit wird jeglicher Fehler bezüglich der Zeitschaltpunkte und auch der Impulsdauer vermieden (Abbildung 56).

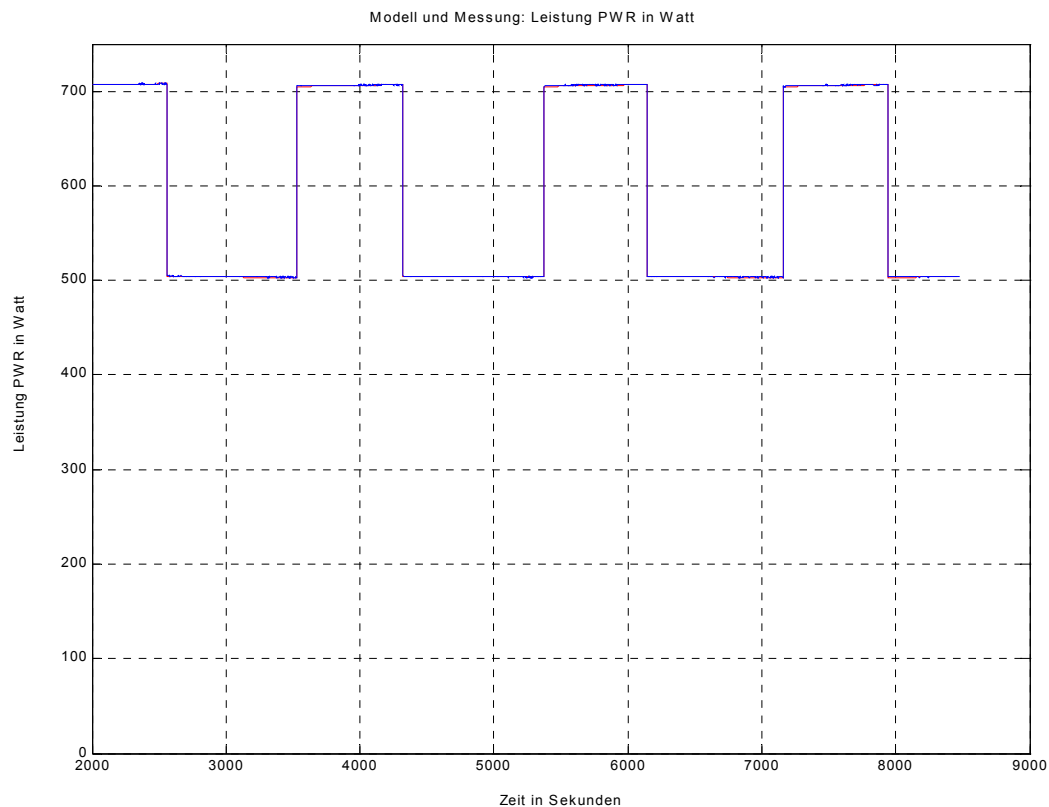


Abbildung 56 Das Eingangssignal P_{el} (rot) des Modells entspricht dem Signal P_{WR} (blau) in der Messung des Lastsprunges von 500 auf 700 Watt. Die Leistung wird in Watt und die Zeit in Sekunden angegeben.

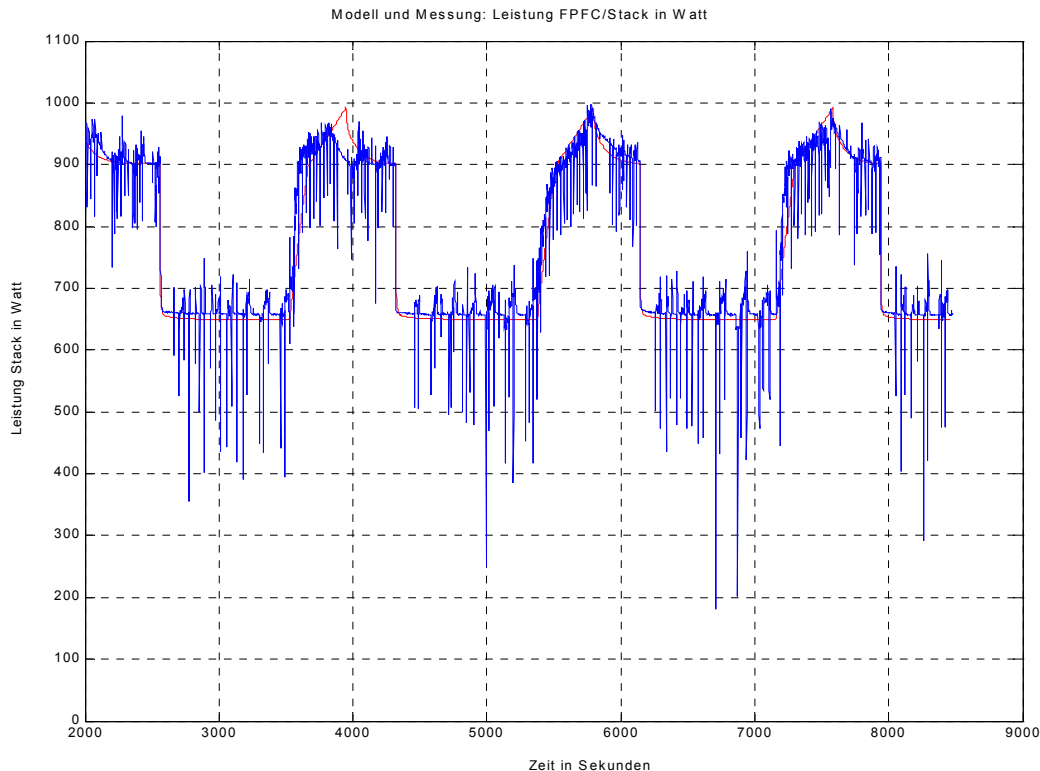


Abbildung 57 Vergleich der Stackleistung P_{FPFC} (rot) des Modells mit jener Leistung P_{Stack} (blau) von der Messung. Die Leistung wird in Watt und die Zeit in Sekunden angegeben.

Als Hauptkriterium gilt die Nachbildung der Ausgangsleistung des Stacks. Nach dem Einschwingvorgang am Anfang der Lastaufschaltung versucht die in Abbildung 57 rot dargestellte Leistung P_{FPFC} des Modells der gemessenen Leistung P_{Stack} , hier blau dargestellt, nachzu-
folgen.

Das Modell des Systems bildet die gemessene Stackleistung P_{FPFC} sehr gut nach.

Bei den zwei letzten Lastsprüngen sind die Spitzenwerte annähernd deckungsgleich, jedoch ist ersichtlich, dass beim vorletzten Sprung die berechnete Leistung von 1000 Watt auf 850 Watt unter jener der gemessenen Stackleistung zurückfällt. Beim letzten Sprung von 650 auf 850 Watt herrscht jedoch wiederum Deckungsgleichheit im Rücken der beiden Leistungssignale.

Bei einer Leistungsabgabe von 650 Watt bleibt eine Leistungsdivergenz von 10 Watt zwischen Modell und Messung bestehen. Die zeitlichen Änderungen der Messwerte können durch das Modell wie bereits vorne erwähnt, nicht nachgebildet werden, da keine Messungen an den Systemhilfsaggregaten durchgeführt wurden.

Die Leistung des DC/DC-Konverter des Modells repräsentiert denselben Verlauf als die Stackleistung in Abbildung 57, nur mit einer geringeren Amplitude.

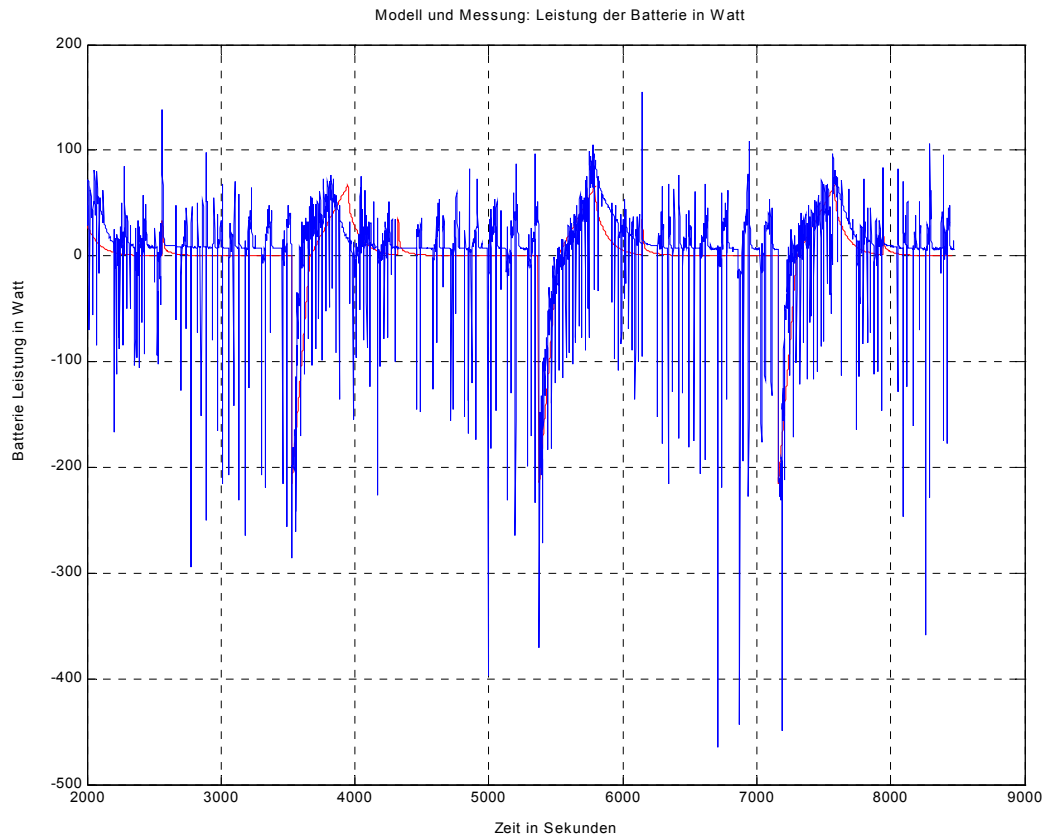


Abbildung 58 Vergleich der Leistung P_{Batt} der Batterie des Modells (rot) mit der gemessenen Batterieleistung P_{Batterie} (blau). Die Leistung wird in Watt und die Zeit in Sekunden angegeben.

Die positiven Spitzen der Batterieleistung des Modells P_{Batt} (rot) in Abbildung 58 stimmen mit jenen der Messwerte P_{Batterie} (blau) nach dem Einschwingvorgang in deren Höhe und auch zum betreffenden Zeitpunkt überein. Die negativen Leistungsspitzen entsprechen einer Entladung der Batterie bei einem Lastsprung von 500 auf 700 Watt, die positiven Leistungsspitzen entsprechen einer Aufladung der Batterie nach dem Abklingen eines solchen Sprunges. Die negative Leistungsspitze beträgt 200 Watt in 140 Sekunden, im Vergleich dazu die positive Spitze mit einem Wert von 65 Watt in 600 Sekunden.

Leistung Watt	Verbrauch gem. Liter/h	Verbrauch gem. kWh/h	Verbrauch ger. Liter/h	Verbrauch ger. kWh/h	Fehler-Brennstoffverbrauch %
200↔400	0,302	0,942	0,291	0,906	3,7
300↔500	1,116	3,479	1,076	3,353	3,6
500↔700	0,851	2,653	0,816	2,545	4,1

Tabelle 16 Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Werte anhand der Verbrauchswerte des Methanol-Wassergemisches anhand des analysierten Lastsprungs von 500 auf 700 Watt.

Vergleicht man den Fehler-Brennstoffverbrauch in Tabelle 16 mit jenem von Tabelle 15, so ist ein größerer Wert seitens des analysierten Lastsprungs auszumachen.

Die Gründe wurden einerseits bereits im Kapitel 7.3.1.6 Übersicht über alle gemessenen Wirkungsgrade angeführt, andererseits kann das zeitliche Verhalten der Stackleistung nur angenähert werden, aber nicht genau nachgebildet. Mit detaillierte Angaben zum zeitlichen Verhalten des Fuel Prozessors und der Fuel Cell wäre diese Aufgabenstellung vermutlich noch besser gelungen.

7.3.5.6 Anmerkungen zum Brennstoffzellensystem FCS 1200

Aufgrund der langen und intensiven Messungen am Brennstoffzellensystem stellen sich dem Betrachter folgende Fragen:

Warum benötigt das System eine so lange Zeit für das Aufladen der Batterie bzw. warum wird die Batterie nicht sofort mit der vollen Leistung des Stacks aufgeladen.

Der Brennstoffzellenstapel selbst hat eine sehr kleine Reaktionszeit (bei 250 ms), die Wasserstoffproduktion (Fuel Prozessor) dürfte bei weitem jedoch noch eine viel größere Trägheit besitzen. Für eine plötzliche Leistungserhöhung steht nur der Wasserstoff der sich in den Leitungen befindet zur Verfügung. Ist dieser verbraucht, so findet im Stack keine Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff an der Proton Exchange Membran mehr statt und es kann letztendlich weder Spannung noch Strom für die am System angeschlossenen Verbraucher bereitgestellt werden.

Die Regelung ist so ausgelegt, dass sukzessive an die gerade benötigte Leistung, die vom Verbraucher bestimmt wird, die Stackleistung herangeführt wird. Die Differenz der Leistungen von Stack und Verbraucher wird aus der Batterie bezogen. Erst wenn die volle von der Last benötigte Leistung vom Stack geliefert wird, wird der Ladezustand der Batterie ins Regelgeschehen miteinbezogen und es findet eine Stackstromerhöhung statt. Der Ladestrom der Batterie erreicht dabei, wie Beobachtungen gezeigt haben, Werte zwischen 1.5 und 4 Ampere. Es wird aber nur kurzzeitig geladen. Dabei bleibt der Ladestrom wie man es annehmen würde nicht konstant sondern wird laufend Schwankungen unterworfen. Der Ladestrom weist große Spitzen in kleinen Zeiteinheiten (Sekunden) auf. Dies alles ist auf die Regelung durch den Controller zurückzuführen, der wiederum den PID-Regler des Systems steuert. Durch ständige Kontrolle des Ladezustandes der Batterie mit einem Sollwert, der durch die Ladekurve der verwendeten Batterie bestimmt wird, werden diese Schwankungen mitverursacht.

Weiters muss berücksichtigt werden dass sich noch Verbraucher (Gebläse, Wasserpumpe) nach Bedarf dazuschalten. Wenn zum Beispiel die Temperatur im Stackbereich zu groß wird erhöht sich die Leistung des Gebläses. Daher auch die vielen Spitzen in der Abbildung 46. Im Betrieb wird das Gebläse von einem Controller nach gewissen, hier unbekannten Kriterien angesteuert. Vermutlich werden noch verschiedene Parameter anderer, ins Regelgeschehen miteinbezogenen Komponenten zueinander in Relation gebracht. Dadurch ist auch die Höhe der Leistungsspitzen nicht immer gleich groß sondern variiert des öfteren.

Einer besseren Modellbildung liegt also ein vertiefender Einblick im zeitlichen Ablauf der Zustandsgrößen des Systems zugrunde. Vor allem betrifft dies den hier als gemeinsamen Block betrachteten Fuel Prozessor/Fuel Cell.

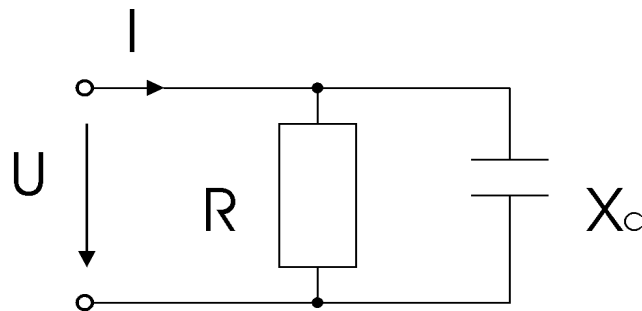
7.3.6 Verbraucher mit ohmsch-induktivem bzw. ohmsch-kapazitivem Verhalten

Um die Bereitstellung der elektrischen Leistung vom Wechselrichter PROsine 1000i überprüfen zu können, werden am Ausgang des Wechselrichters verschiedene Lasten angeschlossen. Damit das gesamte Spektrum der Lasten abgedeckt wird, wurde einmal eine ohmsch-induktive Last und einmal eine ohmsch-kapazitive Last verwendet. Diese Variation des Leistungsfaktors deckt auch das elektrische Verhalten der im alltäglichen Gebrauch verwendeten Geräte ab.

Als Ohmscher Verbraucher dient eine Glühlampe mit 100 Watt. Es soll eine kapazitive und eine induktive Belastung mit jeweils 100 VAR aufgeschaltet werden.

7.3.6.1 Ohmsch-kapazitive Belastung

Schaltung



Messwerte

$U=230.5 \text{ V}$, $I=0.566 \text{ A}$, $S_{AC}=130.45 \text{ VA}$, $P_{AC}=100.24 \text{ W}$.

Daraus berechnete Größen:

$$\text{Blindleistung: } Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{130.45^2 - 100.24^2} = 83.48 \text{ VAr.} \quad (96)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{100.24}{130.45} = 0.768, \quad (97)$$

$$\varphi = \arccos(0.768) = 39.78^\circ. \quad (98)$$

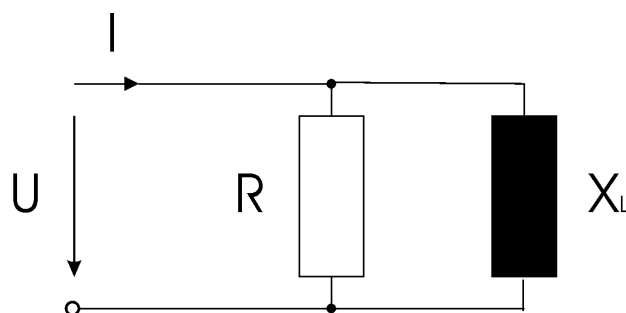
$$Q = UI \sin \varphi = 230.5 * 0.566 * \sin(39.7^\circ) = 83.38 \text{ VAr.} \quad (99)$$

Ergebnis

Der Wechselrichter liefert die benötigte Wirk- und kapazitive Blindleistung an die Last.

7.3.6.2 Ohmsch-induktive Belastung

Schaltung



Messwerte

$U=229.8 \text{ V}$, $I=0.507 \text{ A}$, $S_{AC}=116.5 \text{ VA}$, $P_{AC}=108.8 \text{ W}$.

Daraus berechnete Größen:

$$\text{Blindleistung: } Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{116.5^2 - 108.8^2} = 41.65 \text{ Var.} \quad (100)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{108.8}{116.5} = 0.933, \quad (101)$$

$$\varphi = \arccos(0.933) = 20.94^\circ. \quad (102)$$

$$Q = UI \sin \varphi = 229.8 * 0.507 * \sin(20.94^\circ) = 41.63 \text{ VAr}. \quad (103)$$

Ergebnis

Der Wechselrichter liefert die benötigte Wirk- und induktive Blindleistung an die Last.

7.3.7 Synchroner Netzbetrieb

[12], [13], [14], [15], [16]

Bei der Suche nach einem passendem Wechselrichter stellte sich folgendes Problem:

Die Ausgangsspannung am DC-Ausgang des FC 1200 Systems liegt bei 12 VDC Gleichspannung. Am Markt befindliche Wechselrichter für PV-Anlagen mit Netzkopplung benötigen in der Regel eine viel höhere Eingangsgleichspannung. Bei der Fa. Fronius konnte z. B. ein Wechselrichter vom Typ Sunrise mini-s gefunden werden. Seine DC-Eingangsseite ist für eine Generatorleistung von 700 bis 1550 Wp ausgelegt. Der MPP-Spannungsbereich liegt zwischen 50 und 80 Volt, die maximale Eingangsspannung ist bei 100 Volt erreicht. Die nominelle Leistung beträgt 1100 Watt, die maximale liegt bei 1170 Watt. Um also eine Netzeinspeisung vornehmen zu können, wäre es notwendig, einen Aufwärtswandler von der 12 VDC-Ebene zur 48 VDC-Ebene zu verwenden. Noch viel besser wäre es aber im Hinblick auf den Wirkungsgrad, wenn der in der Brennstoffzelle realisierte DC/DC-Konverter als Zwischenwandlung eingespart würde und die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle direkt zwischen 80 und 100 Volt liegen würde und direkt als Eingangsspannung für den Wechselrichter verwendet würde. Da bei höheren Eingangsspannungen zwangsläufig auch kleinere Ströme auftreten, sind diese auch leichter beherrschbar. Aus diesem Grunde geht der Trend seitens der Hersteller immer mehr zu höheren Eingangsspannungen hin, z. B. sunrise midi mit MPP erregt im Spannungsbereich von 185 bis 360 Volt. Für noch größere Anlagen liegen die MPP-Eingangsspannungen zwischen 150 und 400 Volt mit maximal 500 Volt (z.B. Fronius IG 15).

Weiters wird vermutlich noch eine Strombegrenzung für das Sunrise mini-s Modell benötigt, da dieses mit Strömen bis zu 80 Ampere vom Brennstoffzellensystem belastet werden kann. Dies alles würde eine maßgeschneiderte Lösung von den Herstellern für das spezielle Problem erfordern und sich daher auch dementsprechend im Preis widerspiegeln.

Die Nachfolgeneration des FC 1200 Systems berücksichtigt laut IdaTech bereits dieses Problem durch Bereitstellung einer Netzkopplung mit einer Eingangsspannung von 48 Volt. Es wurde daher beim vorliegenden Brennstoffzellensystem FCS 1200 auf eine teure und wenig effiziente Realisierung verzichtet.

Einer akzeptablen Lösung seitens der Technik stünde auf jeden Fall nichts im Wege. Nach wie vor ist der Preis mit 100 000 bis 120 000 US\$ pro kW für das FC-Gesamtsystem in einer Größenordnung, worin die Investition von zusätzlichen 1000 US\$ für einen netzsynchronen Wechselrichter als relativ klein erscheint.

Erläuterung zu MPP-Spannungsbereich

Bei der Ausführung von Photovoltaikanlagen verwendet man einen Laderegler. Dieser Laderegler ist in Inselstromanlagen das verbindende Element zwischen Solargenerator, Akku und Verbraucher. Seine Hauptaufgabe ist das ordnungsgemäße Laden und Entladen des Akkus

durch Einhalten der Grenzspannungen, also kein Überschreiten der Ladeschluss-Spannung, kein Unterschreiten der Entladeschluss-Spannung. Man unterscheidet folgende Ausführungen von Ladereglern:

Serienregler

Bei Überschreiten der Ladeschluss-Spannung öffnet ein in Serie im Ladestromkreis liegendes Schaltelement (Relais oder Schalttransistor) den Stromkreis. Der Solargenerator läuft somit im Leerlauf.

Shuntregler

Bei Überschreiten der Ladeschluss-Spannung schließt ein parallel zum Ladestromkreis liegendes Schaltelement (Relais oder Schalttransistor). Der Solargenerator wird dadurch kurzgeschlossen.

Serienregler und Shuntregler werden aufgrund ihres einfacheren Aufbaues in kleineren Anlagen verwendet. Nachteil dieser beiden ist, dass der Arbeitspunkt des Solargenerators (Arbeitspunkt auf der Strom-Spannungs-Kennlinie) durch die Akkuspannung bestimmt wird. Dadurch wird der Solargenerator nicht gezielt im Punkt maximaler Leistung (MPP) betrieben.

MPP-Regler

Bei diesem Regler dient ein Gleichspannungswandler zur optimalen Anpassung zwischen Solargenerator (Betrieb im MPP) und den erforderlichen Spannungen für Akku bzw. Wechselrichter. Aufgrund des komplexeren Aufbaues kommen diese Regler erst bei leistungsstärkeren Anlagen zum Einsatz.

7.4 Arbeitsplatz im Christian-Doppler-Pilot-Laboratorium für Brennstoffzellensysteme mit flüssigen Elektrolyten

Die Abbildungen 62 bis 73 zeigen den Messaufbau am Fuel Cell 1200 System im Christian-Doppler-Pilot-Laboratorium für Brennstoffzellensysteme mit flüssigen Elektrolyten. Der Standort wurde unter anderem auch aufgrund seiner guten Infrastruktur ausgewählt. Weiters besteht die Möglichkeit der interdisziplinären Zusammenarbeit mit der technischen Chemie, technischen Physik, dem Maschinenbau und der Verfahrenstechnik.

In der Abbildung 59 sieht man den gesamten Aufbau des Messsystems vor Ort. Im Uhrzeigersinn: Sessel mit Messgeräten, dahinter Induktivitätsmodul, FC 1200 System, am Tisch steht auf dem Oszilloskop das Dewetron Conditioning Rack 8, am Monitor ist das Programm Data Viewer 1.1 von der Firma IdaTech und die eigens entworfene Messsoftware Messung-Dewetron32 dargestellt.

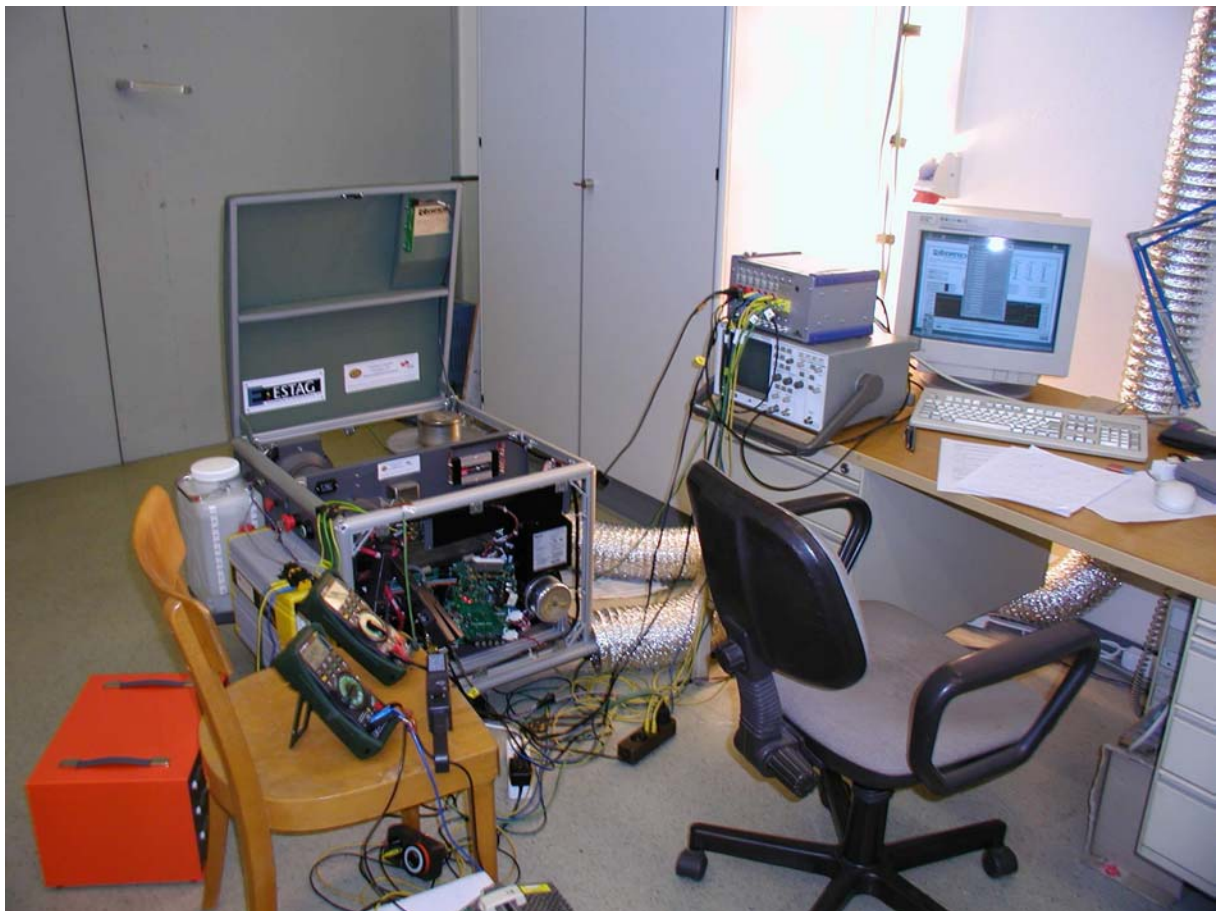


Abbildung 59 Überblick über den gesamten Messaufbau am FC 1200 System von IdaTech.



Abbildung 60 Blick von vorne und oben auf das FC 1200 System.

In der Abbildung 60 hat man einen Überblick von vorne und von oben auf das System. Links neben dem Wechselrichter sieht man das Induktivitätsmodul.

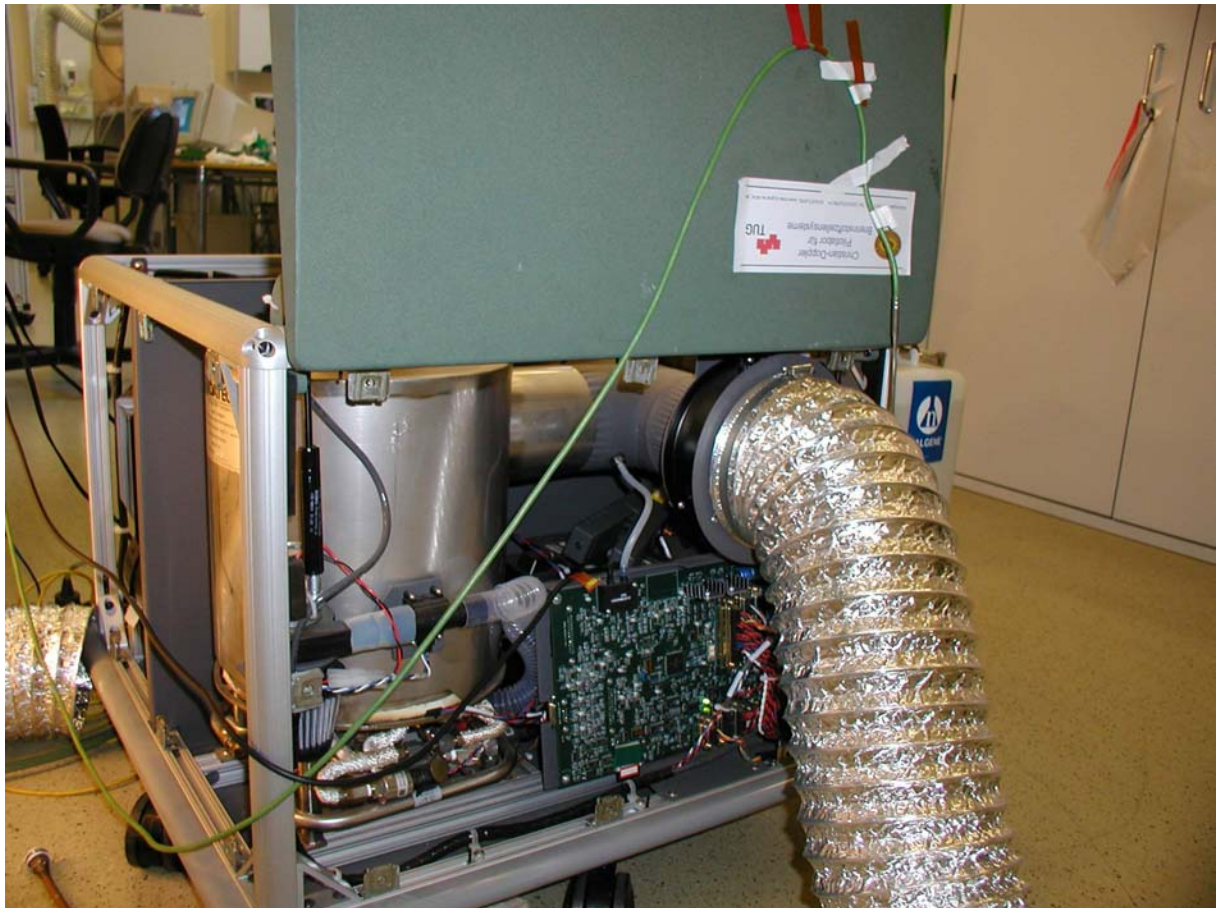


Abbildung 61 Rückenansicht, links Fuel Prozessor mit Ansaugung der Umgebungsluft, rechts oben Abluftgebläse mit Temperaturmessung.

Die Absaugung der Emissionen erfolgt in Abbildung 61 durch einen flexiblen Metallschlauch. Die Temperaturmessung für die Abgase wird mit einem Thermoelement durchgeführt das in den Schlauch gesteckt wird. Links davon sieht man den Fuel Prozessor. Ganz links, am Rahmen befestigt ist die Ansaugung für die Umgebungsluft (für Fuel Prozessor) montiert.

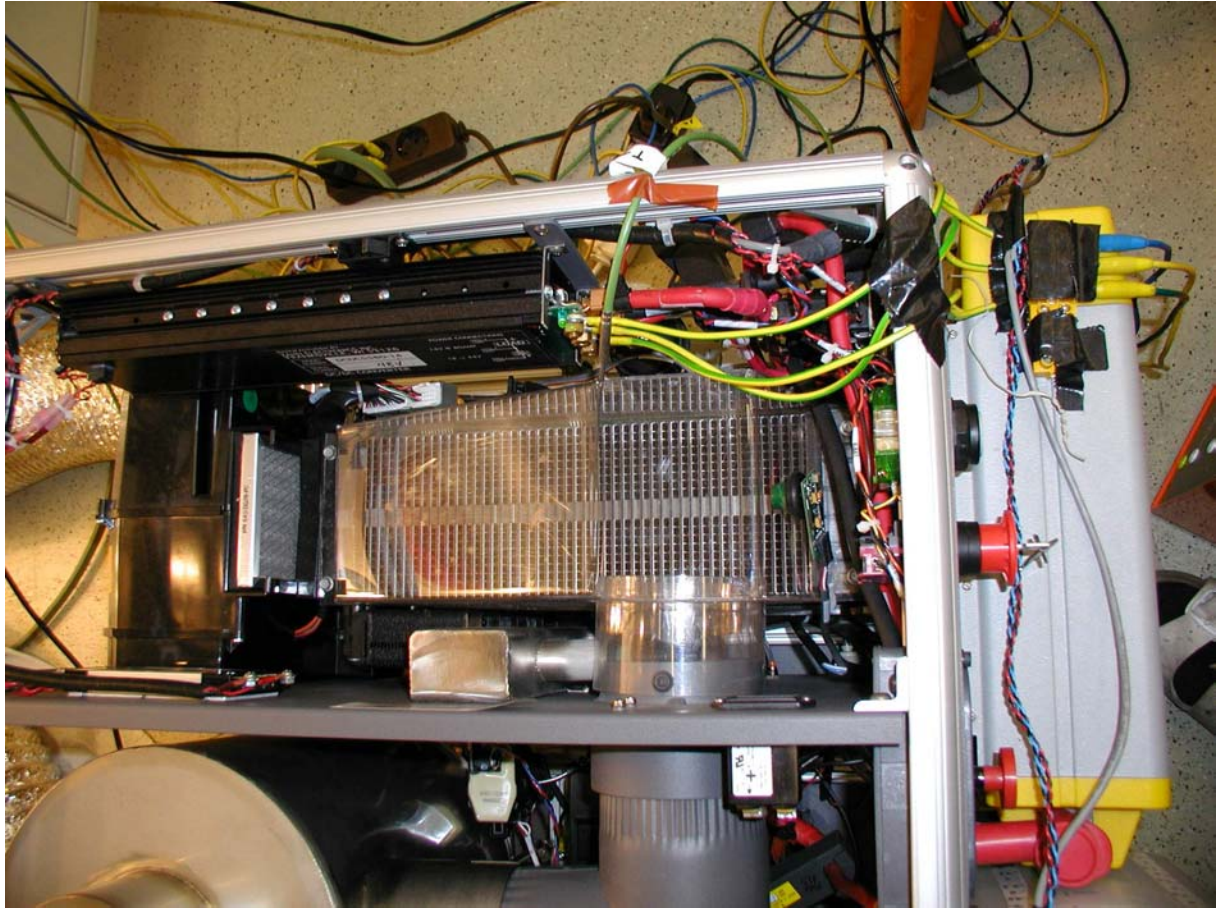


Abbildung 62 Blick von oben auf Stack der mit einem Plexiglas abgedeckt ist zwecks besserer Kühlung. Temperaturmessung der Luft die durch die Kühlöffnungen des Stacks strömt (50-70 °C). Messung von Spannungen am DC/DC-Konverter und der Stackspannung.

In Abbildung 62 blickt man von oben auf die Plexiglasabdeckung vom Brennstoffzellenstapel. Dieser wird mit angesaugter Umgebungsluft gekühlt. Am DC/DC-Konverter, (langer, schmaler rechteckiger Körper) der am Rahmen des Systems befestigt ist, werden die Spannungen für das Messsystem abgegriffen. (Direktes Einlesen in den Messverstärker Dewetron Rack 8).

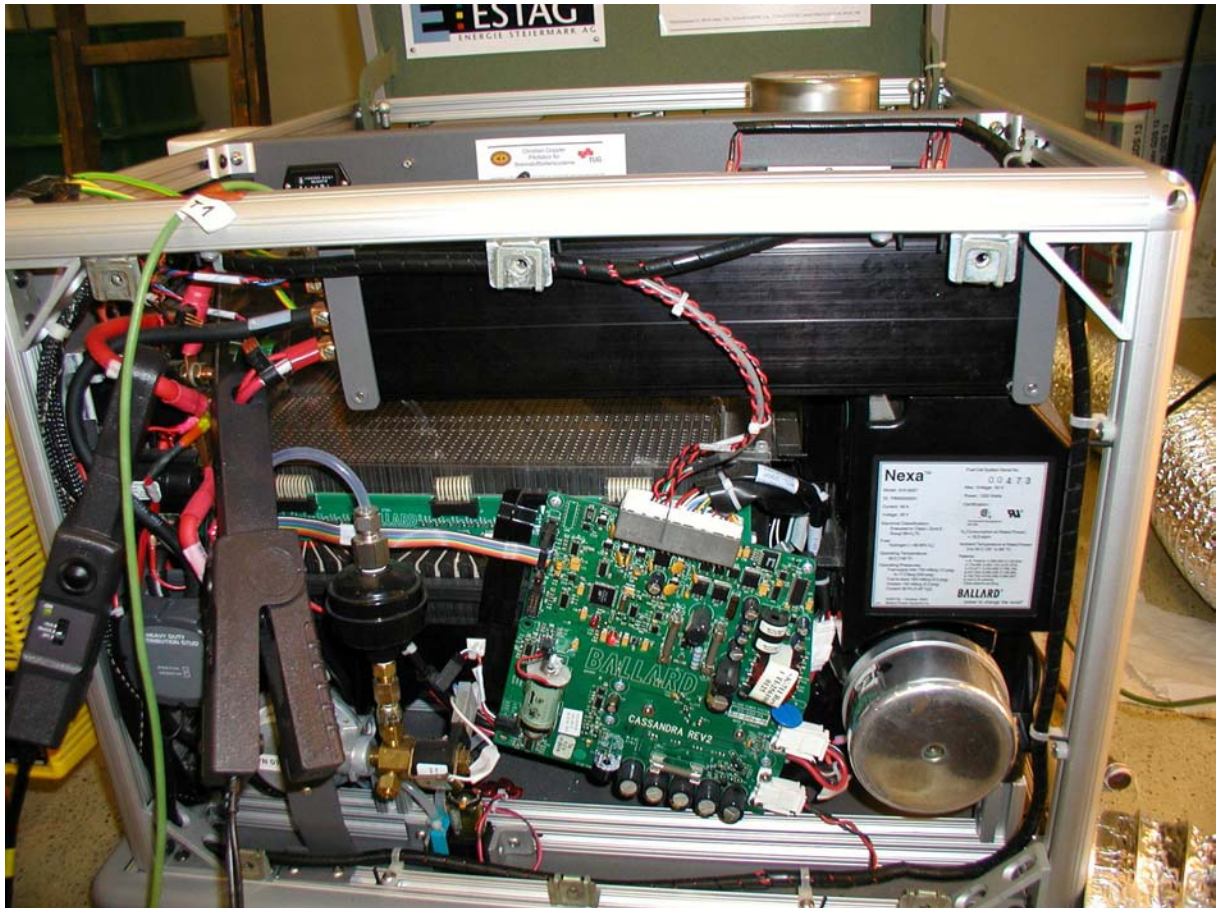


Abbildung 63 Messung der Ströme vom Stack (rechte Stromzange) als auch vom Wechselrichter (linke Stromzange). Links unten Gebläse für die Kühlung des Stacks.

Mit den Stromzangen in Abbildung 63 werden die Ströme vom DC/DC-Konverter (Stromzange links) und vom Stack (Stromzange rechts) gemessen. Die Ballard Cassandra Rev. 2 Platine steuert den Brennstoffzellenstapel an. Links unten in der Ecke ist die Ansaugung (runder Torso) für die Frischluftkühlung des Stacks.

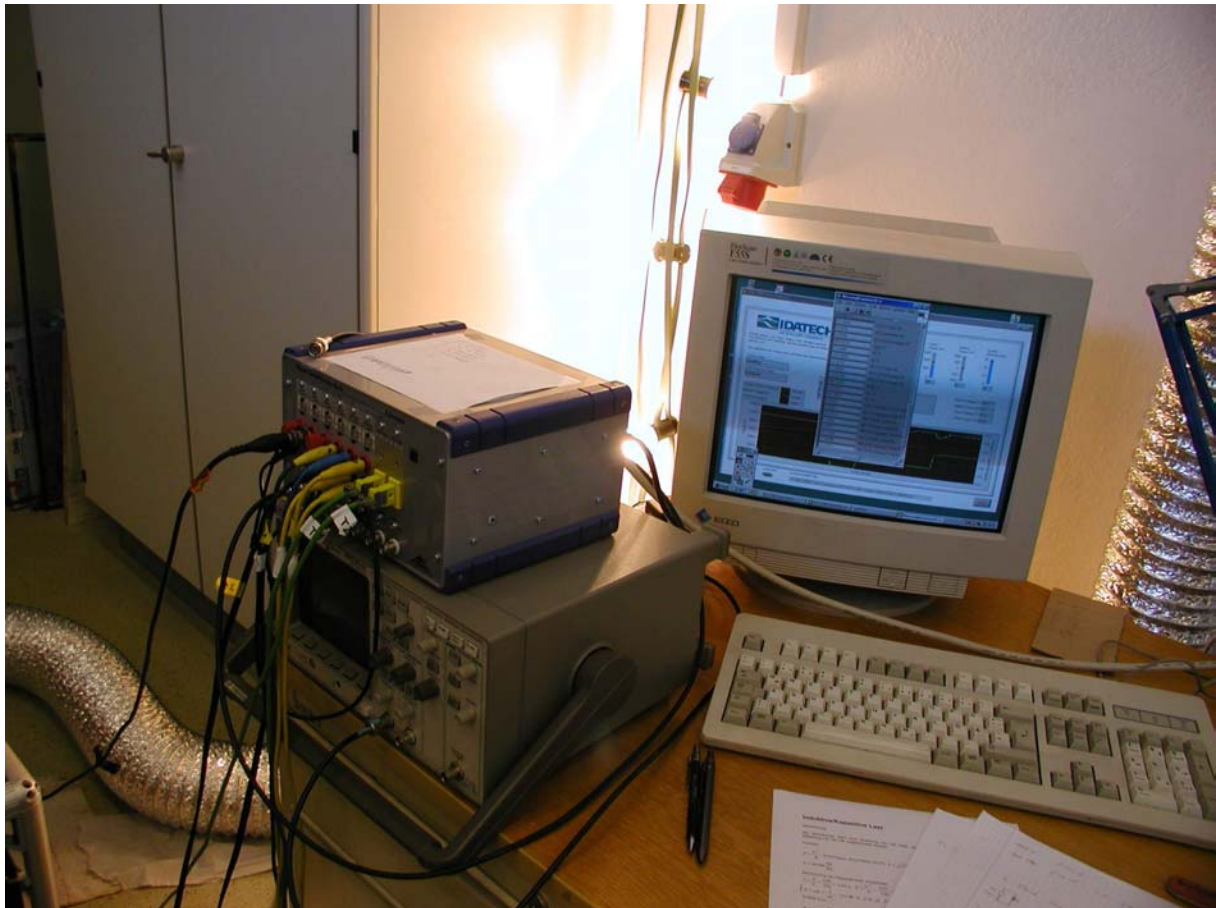


Abbildung 64 Messsystem Dewetron Rack 8, mit 3 Eingangskanälen von 0-50 Volt, mit drei Eingangskanälen von 0-1000 V und mit zwei Thermoelementeingängen. Am Bildschirm der Data Viewer 1.1 (IdaTech Software), in der Mitte sieht man das Messprogramm.

In Abbildung 64 der Messverstärker Dewetron Rack 8. Am Bildschirm sieht man das von IdaTech mitgelieferte Informations- und Überwachungsprogramm Data Viewer 1.1. In der Mitte ist das Programm MessungDewetron32 positioniert.

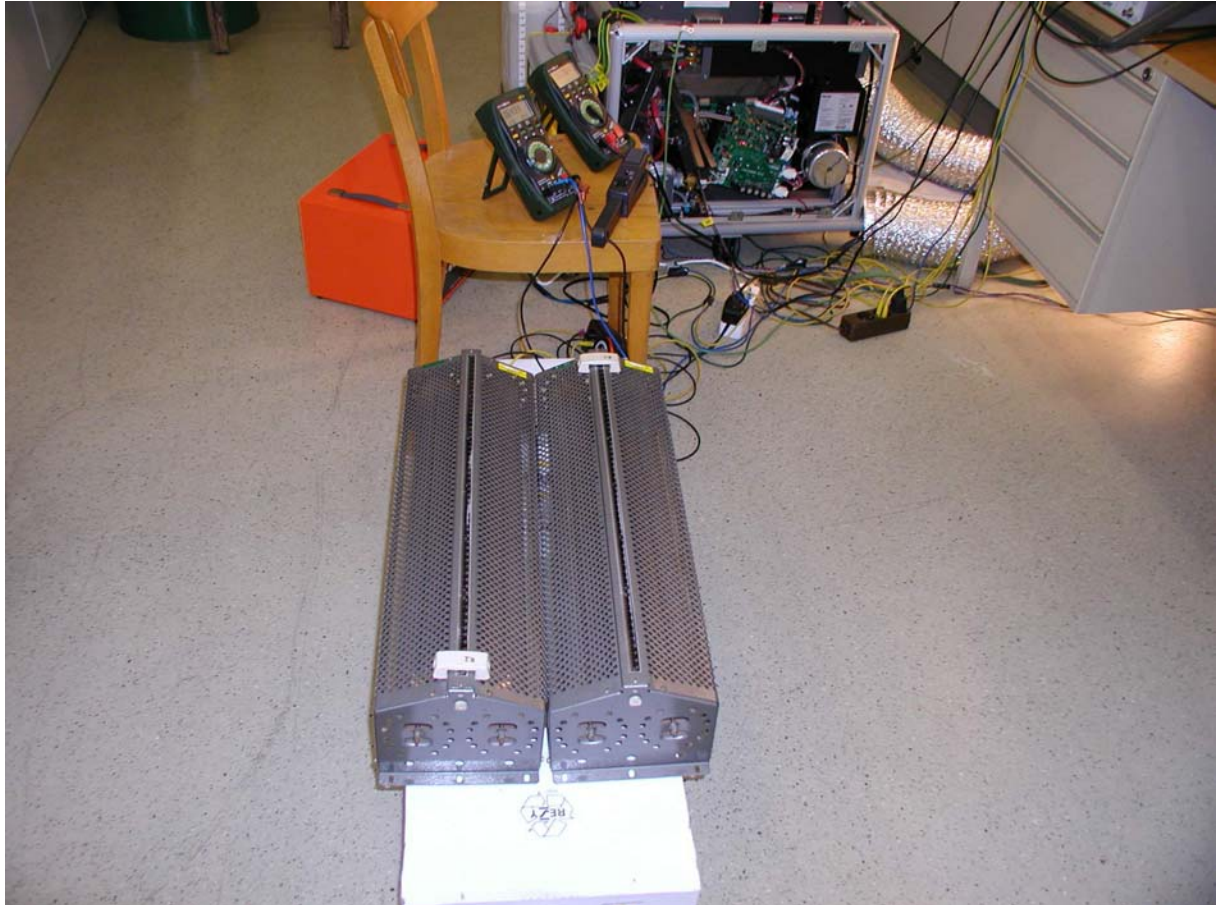


Abbildung 65 Als Last dienen neben der Lichterkette auch noch zwei Widerstände mit je $132\ \Omega$ und einem $I_{\max}$ von $3.2\ \text{A}$. Im Hintergrund auf dem Sessel zwei MetraHit 29 S für die Messung der Wirkleistung als auch des Stromes I_5 am Wechselrichter.

Die beiden Widerstände in Abbildung 65 dienen als Last neben der Glühlampenkette. Über eine Zeitschaltuhr wird ein Widerstand parallel zur Glühlampenkette als ohmscher Verbraucher geschaltet. Damit kann das gesamte Leistungsspektrum, das von dem Fuel Cell System zur Verfügung gestellt wird ($810\ \text{Watt AC}$), abgedeckt werden.



Abbildung 66 Die Auswertung erfolgte teilweise neben den Messungen. Am linken Notebook wurde in Matlab die Auswertung durchgeführt. Das rechte Notebook diente zum Mitprotokollieren der Messwerte im Programm Excel.

Aufgrund der umfangreichen Datenmengen wird die Auswertung soweit dies möglich ist parallel zur Messung gemacht (Abbildung 66). Auf einem Notebook wird ein Protokoll geführt worin folgende Daten festgehalten werden:

- Anzahl der Glühlampen, Skalierung der Widerstände (R_1 , R_2), Betriebsstundenanzahl, Uhrzeit, Last.
- Data Viewer: Batteriespannung, Batteriestrom, System Power Output.
- Multimeter MetraHit 29 S: Spannung, Strom, Wirkleistung P .
- Tank: Brennstoff Inhalt.
- Allgemein: Zustand des Systems (Mode): z.B. Online, $I_5=63.69$ ADC (Strom vom Wechselrichter), $U=13.7$ VDC (Spannung am Wechselrichter), $\eta=29\%$ (Wirkungsgrad des Systems).



Abbildung 67 Bild von oben, man sieht (im Uhrzeigersinn) links unten den Wechselrichter PROsine 1000i, darüber den Tank mit 8 Liter Fassungsvermögen (Methanolwassergemisch), rechts davon das Ansaugrohr für das Gebläse, daneben der Fuel Prozessor, vorne ist der Stack in seiner Plexiglashülle und vor dem Stack befindet sich noch der DC/DC-Konverter.

In Abbildung 67 wird das System aus der Vogelperspektive betrachtet. Die Komponenten wie Wechselrichter, Tank, Absaugung der Emissionen vom Fuel Prozessor und Stack, Fuel Prozessor, Stack mit Plexiglasabdeckung und DC/DC-Konverter sind deutlich sichtbar.

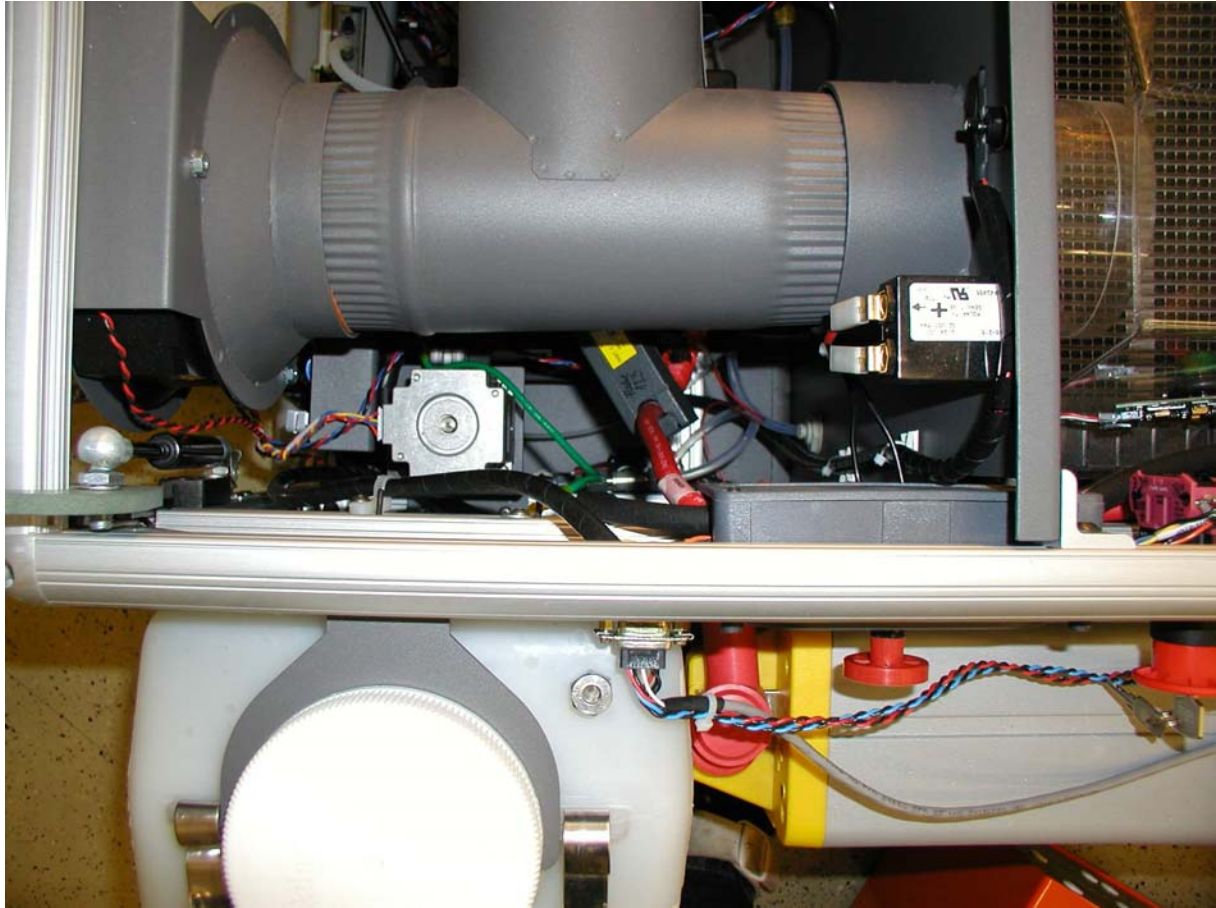


Abbildung 68 Messung des Batteriestromes I_4 mit einer Stromzange (rechts), darüber das Ansaugrohr für das Gebläse, links Blick auf die Brennstoffpumpe.

Ein wichtiger Messpunkt, nämlich der vom Batteriestrom wird in Abbildung 68 gezeigt. Davor links unten der Tank für das Methanolwassergemisch und rechts unten der Wechselrichter. Darüber sind der absperzbare Not-Aus Schalter und links davon das Heavy-Duty-Circuit-Module (Überlasteinrichtung) angebracht. Links neben der Stromzange sieht man die Treibstoffpumpe (Kolbenpumpe) die das Methanolwassergemisch vom Tank in den Fuel Prozessor pumpt.



Abbildung 69 Ansicht aus der Froschperspektive, in der Mitte Platine von Ballard, rechts davon Lüftergehäuse für die Ansaugung der Kühlluft für den Stack, links davon die Wasserstoffzuführung zum Stack.

Aus der Froschperspektive sieht man in Abbildung 69 links neben der Ballard Cassandra Rev. 2 Platine den Wasserstoffreservoirbehälter (schwarz) an dessen unteren Ende links sich, in dieser Perspektive als runder Körper dargestellt, der Druckminderer befindet.



Abbildung 70 Methanolwassergemisch in einem 200 Liter Tank, als Druckmittel wird Stickstoff eingesetzt.

In Abbildung 70 sieht man einen 200 Liter Tank der bereits das vorgemischte Methanol-Wassergemisch enthält. Bei Vollast (850 Watt) verbraucht das System laut Herstellerangaben 1.3 Liter von diesem Gemisch in einer Stunde. Ein Tank sichert also für ca. 154 Stunden den Betrieb des Systems. Da insgesamt 400 Liter vorhanden sind bedeutet dies eine Gesamtbetriebsdauer von 307 Stunden. Da aber das System nicht immer mit Vollast betrieben

wird, kann man eine etwas höhere Stundenanzahl veranschlagen. Als Druckmittel wird Stickstoff (Edelgas), ein inertes Gas, verwendet.

8. Betriebserfahrungen

8.1 Erzielte Leistungen

Das System lieferte bis zu einer Last von 400 Watt AC kontinuierlich Leistung, darüber hinaus trat immer wieder ein „Membrane Preperation Fault“ auf. Dieser Fehler schränkte die Leistungsabgabe des Systems auf unter 600 Watt AC ein. Erst am 8. Juli 2002 gelang es seitens der Firma IdaTech, das System zu optimieren, danach war es möglich, eine maximale Leistung von 810 Watt AC beziehungsweise 980 Watt DC zu erreichen. Nach zwei Wochen trat allerdings wiederum ein Leistungsabfall auf.

Das zur Zeit bestehende aktuelle Problem manifestiert sich in mangelnder Stackleistung vor allem bei Lasten von 400 Watt aufwärts. Der Stack liefert nach ein bis zwei Stunden Betrieb aus nicht ersichtlichen Gründen zuwenig Leistung. Die Differenz wird von der Batterie bezogen. Unter diesen Umständen müssen die Messungen immer wieder abgebrochen werden, um die Batterie nicht völlig zu entladen.

Weiters ist zu bemerken, dass auch die Pumpe, die für das Absaugen der Reaktionsprodukte (H₂O, flüssig und gasförmig) zuständig ist, ab einer Last von 400 bis 500 Watt, wenn überhaupt, nur noch selten zu arbeiten scheint. Dies dürfte auch mit ein Grund dafür sein, dass Wasser ausläuft und sich als Lache unter dem System ansammelt.

Am Dienstag, dem 22. Oktober 2002 zeigte das System Schwierigkeiten, in den Zustand FC-Start zu wechseln. Erst nach mehrfachen Versuchen konnte das System sich selbst Online schalten. Während des Betriebes, es wurden Wirkungsgradmessungen bei dynamischen Lastensprüngen von 200 auf 400 Watt durchgeführt, zeigte sich wiederum starker Wasseraustritt.

Am Mittwoch, dem 23. Oktober 2002 war es nicht mehr möglich, das System über den Zustand „Fuel Prozessor Online“ hinaus hochzufahren. Die Startprozedur lässt sich in folgenden Abschnitten unterteilen: Start Fuel Processor, Fuel Processor Online, Start Fuel Cell, Fuel Cell Online. Es besteht das Problem, vom Zustand „FC-Start“ in den Zustand „FC-Online“ zu wechseln. Nach mehrmaligen Versuchen wurde das System heruntergefahren. Nach einer kurzen Pause wurde noch dreimal versucht das System zu starten. Letztlich schaltete das System nach ungefähr zehn Versuchen automatisch in den „Shut-down“ Modus. Da bei diesen Startversuchen der Batteriestrom bei 4.8 ADC liegt und die Startprozedur auch längere Zeit dauert wurde auf die Batterie Rücksicht genommen und von weiteren Startprozeduren abgesehen. Bei der vorletzten Prozedur wurde der Data Viewer 1.1 in 1-Sekunden-Intervall abgespeichert. Dieses ELG-File wurde an die Fa. IdaTech übermittelt, um eine Ferndiagnose seitens der Hersteller zu ermöglichen.

Trotz der genannten Probleme ist es gelungen, während der gesamten Zeit von 6. Mai bis zum 23. Oktober 2002 eine Systembetriebsstundenanzahl von 557.8 Stunden mit diesem zweiten System zu erreichen. Das erste wurde bei Servicearbeiten vor Ort vom Hersteller nach Auftreten von Problemen Anfang Mai 2002 vollständig ausgewechselt. Da das Servicepersonal von Bend, Oregon (USA) eingeflogen werden muss, war der Systemaustausch die bestmögliche Entscheidung für die Weiterführung der Messungen am FC 1200 System.

Bezugnehmend auf das zweite System stellt sich die Frage, ob bereits von einem Leistungsverlust (Degradation) der Brennstoffzelle selbst, d.h. dass der Brennstoffzellenstapel aufgrund von Alterungserscheinungen zuwenig Leistung liefert, gesprochen werden kann. Ei-

gentlich sollte die Grenze der Systemlebensdauer bei einer Betriebsstundenanzahl von mindestens 1500 Stunden oder noch höher liegen (Ballard gibt eine Lebensdauererwartung von 1500 Stunden für den Stack an).

8.2 Bemerkungen zu den im Messprogramm angeführten Punkten

Das **Betriebsverhalten** des Systems ist abgesehen von den aufgetretenen Störungen als klaglos zu beurteilen. Bei Lastsprüngen wird die benötigte Energie aus der Batterie bezogen, welche nach der Reaktionszeit des Systems anschließend wieder aufgeladen wird. Zudem ist es kein Problem dar, vom Zustand Idle-Mode das System mit der maximal erlaubten Last zu beaufschlagen. Bei intensiven Lastwechseln mit größeren Verbrauchern wird die Batterie stärker entladen, dies verursacht eine längere Aufladephase beim Herunterfahren des Systems (Shut-down).

Für den **Wartungsaufwand**, von den notwendigen Servicearbeiten abgesehen, die zur Verbesserung der Performance des Systems dienen, und den routinemäßigen Kontrollen (Sichtprüfungen), ist für die Zukunft vor Ort ein geschultes Personal erforderlich (Kosten). Das System erkennt die wichtigsten Fehler von selbst und schaltet sich automatisch ab. Für einen vollautomatischen Betrieb wären am Aufstellort noch einige Sensoren zur Überwachung notwendig (Brandmeldeanlage, Vermeidung der Batterieentladung bei auftretenden Fehlern im System, CO-Sensor, ...).

Der **Bedienungskomfort** litt vor allem bei jeder Inbetriebsetzung des Systems. Der Startknopf muss mehrfach und schnell hintereinander gedrückt werden, damit der Haltekontakt geschlossen wird. Entsprechende Hinweise wurden an IdaTech übermittelt. Eine Verbesserung am aktuellen System gab es aber nicht, was wiederum eine Fernbedienbarkeit des Systems und damit einen, wenn auch nur für kurze Zeit andauernden automatischen Vollbetrieb, nicht gestattete. Als Informationsschnittstelle wird ein von IdaTech mitgelieferter Data Viewer 1.1 verwendet, der auf jedem herkömmlichen PC installiert werden kann. Damit ist der Betriebszustand des Systems für den Anwender jederzeit nachvollziehbar. Zudem werden noch Datenfiles mit den aktuellen Zustandsgrößen (ELG-File) laufend mitprotokolliert. Es besteht aber auch die Möglichkeit, das System ohne Data Viewer zu betreiben.

Die **Bedürfnisse der Anwender** sind nicht leicht vorherzusehen. Eine grundlegende Bereitschaft seitens der Anwender, sich mit einem neuen, innovativen und teilweise noch in der Entwicklung befindlichen Energiesystem auseinanderzusetzen, muss man aber schon als eine wesentliche Voraussetzung nennen. Sollte das System in konventionelle Haushalte eingebaut werden, so ist sicherlich eine Automatisierung im Sinne von „nur“ Knopf drücken in weiterer Folge notwendig. Es soll ja für den Betreiber keine Komforteinbußen gegenüber den bereits im Betrieb befindlichen herkömmlichen Systemen geben. Auch einer Einspeisung ins Netz im Sinne des Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz (ELWOG) ist selbstverständlich Rechnung zu tragen. Dem Thema Kraft-Wärme-Kopplung wurde in dieser Untersuchung noch kein Platz eingeräumt, da es auch seitens der Hersteller eine Wärmeauskopplung nicht vorgesehen war, trotzdem ist darauf in Zukunft Bedacht zu nehmen.

9. Zusammenfassung

Der maximale Wirkungsgrad des Systems wurde bei 600 Watt mit 24% erreicht. Dabei muss berücksichtigt werden, dass dieser Wert für das gesamte System gilt. Die Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten können sicherlich noch besser an das System angepasst werden und dadurch den Gesamtwirkungsgrad verbessern. Auch ist zu berücksichtigen, dass der Fuel Processor den Brenner für den Reformer mit dem Methanol-Wassergemisch betreibt. Bei den Untersuchungen mit stationären und dynamischen Verhältnissen am Ausgang des

Wechselrichters hat sich herausgestellt, dass das System voll belastbar und damit elektrisch stabil ist.

Der Temperaturverlauf im Bereich des Brennstoffzellenstapels und am Ausgang des Gebläses zeigen eine Abhängigkeit von der Belastung des Systems. Es werden dabei Temperaturwerte von 50°C bis 80°C erreicht, die auch in der einschlägigen Literatur angeführt werden.

Bei der Zusammensetzung der Abgase am Ausgang des Systems sind die beiden Gase Kohlenmonoxid CO und Kohlendioxid CO₂ zu unterscheiden. Der CO Gehalt liegt bei stationärer Belastung unter 0.03% und stellt somit keine Gefahr für den Menschen dar. Der CO₂ Gehalt zeigt eine Abhängigkeit von der am Ausgang des Wechselrichters angeschlossenen Last. Der maximale Wert liegt unter 0.5%. Kohlendioxid hat keinen direkten schädlichen Einfluss auf den Menschen, es ist aber eine wesentliche Komponente im Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt. Der Methangehalt (CH₄) am Ausgang des Gebläses liegt bei maximaler Leistung bei 0.02%. Dies spricht für eine gute Aufbereitung des Methanol-Wassergemisches für die Wasserstoffgewinnung durch den Fuel Processor. Dies trifft auch für das Verhältnis H₂/N₂ zu, das mit einem Wert von unter 0.3% angegeben werden kann.

Bei der zeitlichen Abhängigkeit der Emissionen ist festzuhalten, dass der Kohlenmonoxidwert bei stationären Verhältnissen bei Null liegt, jedoch bei dynamischen Vorgängen, wie z.B. Laständerungen kurzfristig Spitzen von über 500 ppm erreicht.

Durch die Untersuchung des zeitlichen Verhaltens des Systems, insbesondere hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle selbst, konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

Bei kleinen langsamen Laständerungen reagiert das System sofort. Der Puffer der Batterie wird dabei nur wenig gebraucht, die Erhöhung erfolgt direkt durch die Regelung der Stackleistung. Bei sehr kleinen Lasten (0-200W) fällt das System in einen sogenannten Idle-Mode, der einem Stand-by Zustand des Systems darstellt. In diesem Zustand werden alle Leistungen, die vom System und von den angeschlossenen Verbrauchern benötigt werden, direkt von der Batterie zur Verfügung gestellt. Nach Abfall der Batteriespannung auf einen bestimmten Wert wird die Batterie aufgeladen. Der Idle-Mode kann, abhängig von den angeschlossenen Verbrauchern, zwischen 30 und 45 Minuten dauern. Das System kann auch ohne Last betrieben werden (Systemverluste). Bei großen Laständerungen wird die benötigte Leistung zunächst vollständig von der Batterie bezogen. Nach ein bis zwei Minuten wird die Leistung des Stack hochgeregelt. Werden größere Verbraucher (500-800W) angeschlossen und diese nach längerer Zeit abgeschaltet, so versetzt sich das System nach einem eventuellen Ladevorgang der Batterie von selbst in den Idle-Mode.

Der Wechselrichter ist in der Lage, Verbraucher mit ohmsch-induktiven und ohmsch-kapazitiven Verhalten mit ausreichender Blindleistung zu versorgen.

Es wurde ein Modell in Simulink entworfen, welches das stationäre und dynamische Verhalten des Systems unter Einbeziehung des Verbrauchs des Methanol-Wassergemisches nachbildet. Dabei wurden die gemessenen Wirkungsgrade der einzelnen Systemkomponenten (Fuel Processor/Fuel Cell, DC/DC-Konverter, Wechselrichter) verwendet. Die maximale Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Wirkungsgrad liegt bei 8.5% bei 850 Watt. Es konnte hier nur eine maximale Leistung von 810 Watt AC erreicht werden. Das Modell soll für ein besseres Verständnis der Funktionsabläufe dienen, es wurde aber auch in Hinblick auf die Möglichkeit des Einsatzes einer anderen (zusätzlichen) Batterie hin entworfen.

Ein synchroner Netzbetrieb war nicht möglich, da vom Hersteller nur eine Ausgangsspannung von 12 VDC am System bereitgestellt wurde. Die am Markt befindlichen Geräte stammen alle aus dem Bereich der Photovoltaik und haben aufgrund dessen einen dementspre-

chend hohen Eingangsspannungsbereich von 180 bis 400 Volt. Es konnte zwar ein Wechselrichter mit einem niedrigen Eingangsspannungsbereich (50-80 Volt) gefunden werden, jedoch wären zusätzliche Modifikationen am System notwendig gewesen (Begrenzung des eingespeisten Stromes von der Brennstoffzelle, ein zweiter Wechselrichter zum Erreichen des geforderten Spannungsniveaus, ...). Daher wurde aus technischen wie wirtschaftlichen Aspekten auf eine derartige Realisierung verzichtet.

Bei der Beurteilung des Systems ist zwischen dem Brennstoffzellenstapel (Stack) auf der einen Seite und der Wasserstoffbereitstellung mit Hilfe des Fuel Prozessors auf der anderen Seite zu unterscheiden. Man kann davon ausgehen, dass sowohl der Stack, entwickelt und gebaut vom Marktführer Ballard, als auch der Fuel Prozessor, entwickelt von Fa. IdaTech, einwandfrei arbeiten. Die Probleme dürften möglicherweise in der Systemintegration liegen. Bisher wiesen die Hilfsaggregate, wie Hilfsmotoren (Wasserpumpe), Relais (Startknopf) oder Endstufenverstärker (erstes FCS 1200 Modell) Defekte auf. Es ist zu erwarten, dass bei Verbesserung der Systemintegration ein besseres (Qualitäts-) Niveau erreicht werden kann, und dass damit das Gesamtsystem in Zukunft einwandfrei und wartungsarm funktionieren kann.

10. Abkürzungsverzeichnis

Fa.	Firma
bzw.	beziehungsweise
z.B.	zum Beispiel
DA-Karte	Digital-Analog-Karte
TA Luft	Technische Anleitung Luft
MPP	Maximum Power Point
nWR	Wirkungsgrad des Wechselrichters
nDC	Wirkungsgrad des DC/DC-Konverters
nFPFC	Wirkungsgrad des Blockes Fuel Cell / Fuel Prozessor
GuD	Gas und Dieselmotoren
BZ	Brennstoffzelle
DOE	US-Department of Energy
GM	Gleichstrommaschine
vgl.	vergleiche

11. Literaturverzeichnis

- [1] U.S. Department of Energy: "Fuel Cell Handbook (Fifth Edition)", by EG&G Services Parsons, Inc., Science Applications International Corporation, Under Contract No.DE-AM26-99FT40575, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory P.O. Box 880, Morgantown, West Virginia 26507-0880, October 2000.
- [2] A.K.Kordesch, G. R. Simader: „Fuel Cells and Their Applications“, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1998.
- [3] Konstantin Ledjeff-Hey/Falko Mahlendorf/Jürgen Roes (Hrsg): „Brennstoffzellen, Entwicklung Technologie Anwendung“, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2001, ISBN 3-7880-7629-1.
- [4] C.H. Hamann, W. Vielstich: „Elektrochemie“, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 1998.
- [5] Günter Simader: "Forschung und technologische Entwicklung von Brennstoffzellen für stationäre Energiesysteme und tragbare Kleingeräte", Strategiepapier, Energieverwaltungsagentur, Wien, Oktober 2001, Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.
- [6] Forschungsjournal der Technischen Universität Graz, Herausgeber: Vizerektor für Forschung, Verlag: Verlag der Technischen Universität Graz, 2002.
- [7] Sven Geitmann: "Wasserstoff & Brennstoffzellen, Die Technik von morgen!", Hydrogeit Verlag, Berlin, Januar 2002.
- [8] Rudolf Weber: „Wasserstoff, wie aus Ideen Chancen werden“, IZE-Aktuell, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Publiziert von der Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft (IZE) e. V.
- [9] Hawker: "Genesis Application Manual, fifth Edition", Hawker 2000.
- [10] Ihsan Barin: "Thermochemical Data of pure substances", VCH Weinheim 1989.
- [11] Karl Kordesch, Günter R. Simader: „Fuel Cells and their Applications“, 1996.
- [12] Broschüre: „Fronius IG“, Fronius International GMBH, A 4600 Wels-Thalheim, Günter Fronius-Straße 1.
- [13] Fronius: „Photovoltaik/Wechselrichter“, Broschüre Fronius Vertrieb GmbH & Co KG, A 4600 Wels-Thalheim, Austria.
- [14] KW-Solartechnik: „Die Zukunft der Energie“, Broschüre KW-Solartechnik Ges. m. b. H, Liebenauer Hauptstrasse 2-6, A-8041 Graz, BSC-Liebenau.
- [15] Datenblatt: Solar inverter PSI 300 Philips.
- [16] Datenblatt: Technische Daten der Sunny Family.
- [17] Artikel: Mark Harris: „The Ballard Nexa 1200 Watt Compact Power Supply“, Fuel Cell Today, August 2002.
- [18] Ballard, „Ballard fuel cell power module Nexa“, Ballard Power Systems Inc., 9000 Glenlyon Parkway Burnaby, British Columbia, Canada V5J 5J9.
- [19] David Edlund: „A versatile, low-cost, and compact fuel processor for low-temperature fuel cells“, Senior Vice President, Chief Technology Officer, IdaTech, Bend, Oregon, USA.
- [20] David Edlund: „Balance-Of-Plant Issues For Distributed Generation: A Case Study“, IdaTech, LLC, Bend, OR, USA.
- [21] IdaTech: „Comparison of Energy needed to produce pure hydrogen using IdaTech's fuel processor“, IdaTech, Bend, Oregon, USA.
- [22] A. Dickman, D. Edlund, and C. Dearing: "Development of a 1 kW Fuel Cell System for portable/recreational markets", IdaTech, LCC, Bend, P.O. Box 5339 Oregon 97708, USA.

- [23] D. J. Edlund, W. A. Pledger, and A. Dickman: "Field testing residential fuel cell systems", IdaTech, LLC, P.O. Box 5339, Bend, Oregon 97708, USA.
- [24] David J. Edlund: „Fuel Cells: An emerging option for small-scale distributed generation", Senior Vice President, Chief Technology Officer, IdaTech, Bend, Oregon, USA.
- [25] David Edlund: „Fuel Processors for small-scale stationary PEMFC Systems", Senior Vice President, Chief Technology Officer, IdaTech, Bend, Oregon, USA.
- [26] David Edlund, Ph. D.: "Fuel selection and fuel processor issues for the near-term commercialisation of fuel cell systems", Senior Vice President, Chief Technology Officer, IdaTech, LCC, Bend, Oregon, USA.
- [27] IdaTech: "Methanol vs. Gasoline – Contrast and Comparison", IdaTech, Bend, Oregon, USA.
- [28] S. McDermott, D. Edlund, W. A. Pledger, K. Pearson, and D. Kelly: "Results of fuel processor lifetime testing", IdaTech, LCC, P.O. Box 5339, Bend, Oregon 97708, USA.
- [29] David Edlund; Northwest Power Systems by William Pledger, Craig Holmes, and Thomas Herron; Northwest Power Systems: "Small scale fuel cell systems for distributed and on-site power generation", USA.
- [30] A.J. Appleby, F.R. Foulkes: „Fuel Cell Handbook", Van Nostrand Reinhold, New York, 1989, ISBN 00-442-31926-6.
- [31] Leo J.M.J. Blomen, Michael N. Mugerwa: „Fuel Cell Systems", Plenum Press New York and London 1993, ISBN 0-306-44158-6.
- [32] U.S. Department of Energy: „FY 2000 Progress Report for Fuel Cell Power Systems", Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Transportation Technologies, October 2002, U.S. Department of Energy, Office of Advanced Automotive Technologies, 1000 Independence Avenue, S.W., Washington, DC 20585-0121.
- [33] Hans Dieter Baehr: „Thermodynamik Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen", Siebente, korrigierte Auflage, Springer Verlag 1989, ISBN 3-540-50773-6.
- [34] Rudolf Brdička: "Grundlagen der physikalischen Chemie", 15., bearbeitete Auflage von Jiří Dvořák, Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin 1990, ISBN 3-326-00099-5.
- [35] Helmut Karger, „Info Brief Nr. 09, Scheinleistung und Blindleistung in Dreileiter-Drehstromnetzen", a-eberle GmbH, Aalener Str. 30/32, D-90441 Nürnberg.
- [36] D.A. Marshall, J.D. van Wyk, F.P. Venter, L. Malesani, A. Zuccato: „A Comparative Evaluation of Power Theories", D.A. Marshall, J.D. van Wyk, F.P. Venter from Energy Laboratory, Engineering Faculty, Rand Afrikaans University, P.O. Box 524, Johannesburg, 2000, Republic of South Africa. L. Malesani, A. Zuccato from Department of Electrical Engineering, University of Padova, via Gradenigo, 6/a, 35131, Padova, Italy.
- [37] N.L. Kusters and W.J.M. Moore: „On the definition of reactive power under non-sinusoidal conditions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 5. Sept/Oct 1980, p 1845-1850.
- [38] U.S. Department of Energy: „FY 2000, Progress Report for Fuel Cell Power Systems", Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Transportation Technologies, Steven Chalk Energy Conversion Team Leader, U.S. Department of Energy, Office of Advanced Automotive Technologies, 1000 Independence Avenue, S.W. Washington, DC 20585-0121, October 2000.
- [39] R. Derby: "Unleashing fuel cells`Holy Grail", Fuel Cells Bulletin 3 (December 1998) 6-8.
- [40] S. Ahmed, R. Kumar, and M. Krumplet: "Fuel processing for fuel cell power systems", Fuel Cells Bulletin 12 (September 1999) 4-7.
- [41] Herwig Renner: „Beitrag zur Problematik der Oberschwingungsimpedanz- und Oberschwingungsemissionsermittlung in elektrischen Energieversorgungsnetzen", Dissertation, Graz Dezember 1994, dbv-Verlag Verlag für die Technische Universität Graz.
- [42] Krikava, Ruhswurm, Seiser: „Grundlagen der Elektrotechnik 2", 1988 R. Oldenbourg Verlag Wien.

- [43] Krikava, Ruhswurm, Seiser: „Grundlagen der Elektrotechnik 1“, 1987 R. Oldenbourg Verlag Wien.
- [44] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes- Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)“, vom 24. Juli 2002. Der amtliche Text ist im Gemeinsamen Ministerialblatt vom 30. Juli 2002 (GMBI. 2002, Heft 25-29, S.511-605) veröffentlicht worden und kann über die Carl Heymanns Verlag KG, Luxemburger Straße 449, 50939 Köln oder den Buchhandel bezogen werden.
- [45] Viktor Hacker: „Vorlesung Umweltmanagement ökologische Grundlagen“, 15. Jänner 2002, Abteilung für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, Technische Universität Graz.
- [46] PROsine Inverter Owner's Manual: „PROsine 1000i Inverter“, PROSINE is a trademark of Statpower Technologies Partnership. 1998, 1999 Statpower Technologies Partnership.
- [47] Statpower: „PROsine 1000i Wechselrichter Benutzerhandbuch“, 1998, 1999 Statpower Technologies Partnership.

Literatur für vertiefendes Studium:

- [48] J.Heck, W. Kaim, M.Weidenbruch: “Anorganische Chemie”, Wiley-VCH 1997, ISBN 3-527-29250-0.
- [49] Stuart H. Rubin, Marion G. Cerutti: "Application of Extended Plausible-Reasoning Theory to Fuel-Cell Design", IEEE, 2001.
- [50] Bernd Kohlstruck: „Applications with proton exchange membrane (PEM) fuel cells for a deregulated market place“, CIRED 2001, 18-21 June 2001, Conference Publication No. 482 IEE 2001.
- [51] Sanjeev Mukerjee, Richard C. Urian: “Bifunctionality in Pt alloy nanocluster electrocatalysts for enhanced methanol oxidation and CO tolerance in PEM fuel cells: electrochemical and in situ synchrotron spectroscopy”, Electrochimica Acta 00 1-13, 2002, received in revised form 4 April 2002-09-12.
- [52] Aida Rodrigues, John C. Amphlett, Ronald F. Mann, Brant A. Peppley, and Pierre R. Roberge: “Carbon Monoxide Poisoning of Proton-Exchange Membrane Fuel Cells”, Royal Military College of Canada, Department of Chemistry and Chemical Engineering, Kingston, Ontario, K7K 7B4, Canada.
- [53] Xiao-Zi Yuan, Zi-Feng Ma, Qi-Zhong Jiang, Wie-Sheng Wu: „Cogeneration of cyclohexylamine and electrical power using PEM fuel cell reactor”, Electrochemistry Communications 3 (2002), 599-602.
- [54] Gregg A. Deluga, Shawn C. Kelley, Bryan Pivovar, David A. Shores, and William H. Smyrl: “Composite Membranes to Reduce Crossover in PEM Fuel Cell”, University of Minnesota, Corrosion Research Center, 221 Church St. SE 112 Amundson Hall, Minneapolis, MN 55455, USA 2000 IEEE.
- [55] Jeremy P. Meyers, Helen L. Maynard: “Design considerations for miniaturized PEM fuel cells”, Journal of Power Sources 109 (2002) 76-88, 2002 Published by Elsevier Science B.V.
- [56] Amir Abtahi, Ali Zilouchian and Michel Fuchs: “Design and Implementation of a Hierarchical Control Strategy for Proton Exchange Membrane Fuel Cells”, Proceedings of the 37TH IEEE Conference on Decision & Control, Tampa, Florida USA, December 1998, 1998 IEEE.
- [57] Whitney Colella: „Design options for achieving a rapidly variable heat-to-power ratio in a combined heat and power (CHP) fuel cell system (FCS)“, Journal of Power Sources 106 (2002) 388-396, 2002 Elsevier Science B.V.

- [58] H.I. Lee, C.H. Lee, T.Y. Oh, S.G. Ghoi, I.W. Park, K.K. Baek: „Development of 1 kW class polymer electrolyte membrane fuel cell power generation system”, *Journal of Sources* 107 (2002) 110-119.
- [59] Jeferson Marian Correa, Felix Alberto Farret, Luciane Neves Canha: “An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using an Electrochemical Model”, *IECON'01: 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- [60] Zhigang Qi, Chunzhi He, Arthur Kaufman: „Effect of CO in the anode fuel on the performance of PEM fuel cell cathode”, *Journal of Sources* 4880 (2002) 1-9.
- [61] Earl Carey, Richard Lawrance, Daniel Steiger: „Enhanced Mission Duration for underwater Vehicle using a PEM fuel cell source“, Earl Carey Naval Research Laboratory 4555 Overlook Ave. S. W. Washington D. C. 20375-5000, Richard Lawrance Treadwell Corporation, Daniel Steiger Naval Research Laboratory.
- [62] Ken-Ichiro Sotowa, Yasuhisa Hasegawa, Katsuki Kusakabe, Shigeharu Morooka: „Enhancement of CO oxidation by use of H₂-selective membranes impregnated with noble-metal catalysts”, *International Journal of Hydrogen Energy* 27 (2002) 339-346.
- [63] Henry J. DeRonck: „Fuel Cell Power Systems for Submersibles“, International Fuel Cell Corporation, South Windsor, CT 06074 USA.
- [64] John H. Hirschenhofer: “Fuel Cell Status: 1996”, Parsons Power Group, Inc., *IEEE AES Systems Magazine*, March 1997.
- [65] Tom Gilchrist: „Fuel cells to the fore“, *IEEE Spectrum* November 1998, 35-40.
- [66] Michael W. Fowler, Ronald F. Mann, John C. Amphlett, Brant A. Peppley, Pierre R. Roberge: “Incorporation of voltage degradation into a generalised steady state electrochemical model for a PEM fuel cell”, *Journal of Power Sources* 106 (2002) 274-283.
- [67] F.A. de Bruijn, D.C. Papageorgopoulos, E.F. Sitters, G.J.M. Janssen: „The influence of carbon dioxide on PEM fuel cell anodes”, *Journal of Power Sources* 110, (2002) 117-124.
- [68] J. Hall, R. Kerr: „Innovation dynamics and environmental technologies: the emergence of fuel cell technology“, *Journal of Cleaner Production* 2002, DTD v4.3.1 /JCLP789.
- [69] Andrew Rowe, Xianguo Li: „Mathematical modelling of proton exchange membrane fuel cells”, *Journal of Power Sources* (2001) 82-96.
- [70] Roland Dittmeyer, Volker Höllein, Kristian Daub: „Membrane reactors for hydrogenation and dehydrogenation process based on supported palladium“, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 173 (2001) 135-184.
- [71] J. Wind, R. Späh, W. Kaiser, G. Böhm: „Metallic bipolar plates for PEM fuel cells“, *Journal of Power Sources* 105 (2002) 256-260.
- [72] A. Kazim, T.N. Veziroglu: “Role of PEM fuel cells in diversifying electricity production in the United Arab Emirates”, *International Journal of Hydrogen Energy* 2002, HE 1421, pp 1-7.
- [73] Akkarat Manasilp, Erdogan Gulari: „Selective CO oxidation over Pt/alumina catalysts for fuel cell applications“, *Applied Catalysis B: Environmental* 37 (2002) 17-25.
- [74] Johan Agrell, Henrik Birgersson, Magali Boutonnet: „Steam reforming of methanol over a Cu/ZnO/AL₂O₃ catalyst: a kinetic analysis and strategies for suppression of CO formation”, *Journal of Power Sources* 106 (2002) 249-257.
- [75] Isa Bar-On, Randy Kirchain, Richard Roth: „Technical cost analysis for PEM fuel cells“, *Journal of Power Sources* 109 (2002) 71-75.
- [76] G. Cacciola, V. Antonucci, S. Freni: “Technology up date and new strategies on fuel cells”, *Journal of Power Sources* 100 (2001) 67-79.
- [77] S.F. Simpson, J. Ferral, P. Sokolov, and T.J. Rehg: “The effect of pressure on an air-reformate proton exchange membrane (PEM) fuel cell system”, 199 IEEE, AlliedSignal Aerospace Equipment Systems Torrance, CA.

Matlab:

- [78] Adrian Biran, Moshe Breiner: „Matlab 5 für Ingenieure, Systematische und praktische Einführung“, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Addison-Wesley Verlag, 1999, ISBN 3-8273-1416-X.
- [79] Josef Hoffmann, Urban Brunner: „Matlab & Tools für die Simulation dynamischer Systeme“, Addison-Wesley Verlag 2002, ISBN 3-8273-1895-5.
- [80] The MathWorks: „Matlab The Language of Technical Computing, Using Matlab Version 5“ The MathWorks 1996, Inc., 24 Prime Park Way, Natick, MA 01760-1500 USA.
- [81] The MathWorks: “Simulink Dynamic System Simulation for Matlab”, User’s Guide Version 2.1, 1997 online Version, The MathWorks, Inc., 24 Prime Park Way Natick, MA 01760-1500 USA.
- [82] Ottmar Beucher: „Matlab und Simulink lernen. Grundlegende Einführung.“, Addison-Wesley Verlag, 2000, ISBN 3-8273-1639-1.

12. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Funktionsprinzip von Brennstoffzellen (Membran-Brennstoffzelle PEFC, Quelle:[3]).....	6
Abbildung 2 Vergleich des Carnot- mit dem idealen Brennstoffzellen-Wirkungsgrad (Quelle: [3]).....	8
Abbildung 3 Darstellung einer Strom/Spannungskennlinie (Schema, Quelle: [3]).....	9
Abbildung 4 Prinzipdarstellung der verschiedenen Brennstoffzellentypen (Quelle: [3]).....	12
Abbildung 5 Brennstoffzellen-Gesamtsystem (als vereinfachtes Schema dargestellt, Quelle: [3]).....	19
Abbildung 6 Elektrische Wirkungsgrade verschiedener Techniken zur Strom- und Wärmeerzeugung auf Erdgasbasis (Quelle: [3], von GEC Alstom).	20
Abbildung 7 PEM-Brennstoffzelle, schematischer Aufbau (Quelle: [3]).....	24
Abbildung 8 Stromdichte/Spannungskennlinien einer PEM-Brennstoffzelle unter verschiedenen Betriebsbedingungen (Quelle: [3]).....	25
Abbildung 9 Nexa Power Module (Quelle: [17]).....	31
Abbildung 10 Ballard Fuel Cell Power Module Nexa 1200 Watt (Quelle: [18]).....	32
Abbildung 11 Fuel Prozessor (IdaTech), der Wasserstoffreiniger ist vollständig integriert (mechanisch und thermisch) mit dem Wasserstoffproduzierendem Teil (Quelle: [28])...	35
Abbildung 12 Gesamtsystem aus Vogelperspektive (li.) und von Seite (re.).....	42
Abbildung 13 Einzelkomponenten des Fuel Cell 1200 Systems von IdaTech.	42
Abbildung 14 Schema des Wasserstoffaufbereitungsprozesses.	43
Abbildung 15 Blockschaltbild FCS 1200 System.	44
Abbildung 16 Schaltung der Last vor Ort.	45
Abbildung 17 Als Informationsschnittstelle für das FC 1200 System dient der Data Viewer 1.1 von der Fa. IdaTech.	46
Abbildung 18 Flussdiagramm vom Einleseprogramm MessungDewetron32 (LabView).....	49
Abbildung 19 DAQN-THERM Anschlussbelegung.....	50
Abbildung 20 Messaufnehmer und Messumformer sind im DAQN-Modul bereits integriert. Darstellung der Verarbeitungskette des Temperatursignals (Spannung im mV Bereich) vom Messaufnehmer über den Messverstärker zum Dewetron Rack 8. Anschließend werden die Daten über die Analog/Digital-Karte ins LabView-Programm MessungDewetron32 eingelesen. Die Auswertung findet mit Hilfe des Programms Matlab 6.1 statt.....	50
Abbildung 21 Wirkungsgrad des Blockes Fuel Prozessors/Fuel Cell in Abhängigkeit der Ausgangsleistung des Wechselrichters PROsine 1000i.	54
Abbildung 22 Wirkungsgrad des DC/DC-Konverters in Abhängigkeit der Ausgangsleistung des Wechselrichters PROsine 1000i.....	55
Abbildung 23 Wirkungsgrad des Wechselrichters in Abhängigkeit der Ausgangsleistung des Wechselrichters PROsine 1000i.	56
Abbildung 24 Wirkungsgrad des gesamten FC 1200 Systems in Abhängigkeit der Ausgangsleistung am Wechselrichter PROsine 1000i.....	57
Abbildung 25 Temperatur des Luftstromes im Stackbereich in °C.....	60
Abbildung 26 Temperatur der Abgase am Gebläseausgang in °C.	61
Abbildung 27 Verlauf des Kohlenmonoxidgehaltes in Prozent über die Zeit aufgetragen.	62
Abbildung 28 Verlauf des Kohlenmonoxidgehalts in ppm über die Zeit aufgetragen.....	63
Abbildung 29 Verlauf des Kohlendioxidgehalts in Prozent über die Zeit aufgetragen.....	64
Abbildung 30 Verlauf des Kohlendioxidgehalts in ppm über die Zeit aufgetragen.	64
Abbildung 31 Verlauf des Methangehalts in Prozent über die Zeit aufgetragen.	65
Abbildung 32 Verlauf des H ₂ /N ₂ Verhältnisses über die Zeit aufgetragen.	65
Abbildung 33 Kohlenmonoxidgehalt in Prozent in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.	66
Abbildung 34 Kohlenmonoxidgehalt in ppm in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.	67

Abbildung 35 Kohlendioxidgehalt in Prozent in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.	67
Abbildung 36 Kohlendioxidgehalt in ppm in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.	68
Abbildung 37 Methangehalt in Prozent in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.	68
Abbildung 38 Wasserstoff-Stickstoffverhältnis in Abhängigkeit der Leistung am Ausgang des Wechselrichters PROsine 1000i.	69
Abbildung 39 Lastsprung am 6. August 2002 von 100 auf 600 Watt. Auf der Ordinate ist die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.	70
Abbildung 40 Lastsprung am 1. August 2002 von 400 auf 700 Watt. Auf der Ordinate ist die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.	71
Abbildung 41 Lastsprung am 29. Juli 2002 von 0 auf 300 Watt. Auf der Ordinate ist die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.	71
Abbildung 42 Lastsprung am 29. Juli 2002 von 0 auf 800 Watt. Auf der Ordinate ist die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.	72
Abbildung 43 Modell mit der Einbindung der Messwerte vom FC 1200 Systems.	75
Abbildung 44 Modell zur Nachbildung der dynamischen Verhältnisse bei einem Lastsprung von 300 auf 500 Watt am Ausgang des Wechselrichters des FC 1200 Systems. Die Blöcke links oben in der Abbildung 44 dienen zur Nachbildung einer dynamischen Last. Zur Nachbildung einer dynamischen Last wird eine Sprungfunktion erzeugt, die die zeitlichen und amplitudenmäßigen Änderungen der Last am Ausgang des Wechselrichters nachvollzieht.	77
Abbildung 45 Einlesen und Berechnung der Messwerte im Programm MessungDewetron32 (Lab View, Ausschnitt aus der Messverarbeitungskette).	79
Abbildung 46 Wirkungsgradmessung 500 Watt. Überblick über die gemessenen Leistungen von S_{AC} , P_{AC} , P_{Batt} , S_{Stack} , P_{Stack} . Auf der Ordinate wird die Leistung aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit.	80
Abbildung 47 Verlauf des Batteriestromes I_4 (grün) über der Zeit bei Wirkungsgradmessung 500 Watt. Auf der Ordinate ist der Strom in Ampere aufgetragen und auf der Abszisse die Zeit.	81
Abbildung 48 Der Batteriestrom I_4 in Ampere vom Modell berechnet wird über die Zeit in Sekunden aufgetragen.	81
Abbildung 49 Verlauf der Batterieleistung P_{Batt} (violett) über der Zeit. Auf der Ordinate wird die Leistung in Watt angegeben und auf der Abszisse die Zeit.	82
Abbildung 50 Die Leistung der Batterie in Watt vom Modell berechnet wird über die Zeit in Sekunden aufgetragen.	83
Abbildung 51 Verlauf der Scheinleistung S_{Batt} der Batterie (S_{Batt} , türkis). Auf der Ordinate wird die Leistung in Watt angegeben und auf der Abszisse die Zeit.	83
Abbildung 52 Verlauf der Stackleistung (S_{Stack} , rot; P_{Stack} , türkis; deckungsgleich) über die Zeit bei einer Wirkungsgradmessung von 500 Watt.	84
Abbildung 53 Die Leistung des Blocks Fuel Prozessor/Fuel Cell P_{FPFC} in Watt vom Modell berechnet wird über die Zeit in Sekunden aufgetragen.	85
Abbildung 54 Die Leistung des Blocks DC/DC-Konverters P_{DC} in Watt vom Modell berechnet wird über die Zeit in Sekunden aufgetragen.	86
Abbildung 55 Modell für die Nachbildung des Lastsprunges von 500 auf 700 Watt in einem 15-Minuten-Intervall.	88
Abbildung 56 Das Eingangssignal P_{ei} (rot) des Modells entspricht dem Signal P_{WR} (blau) in der Messung des Lastsprunges von 500 auf 700 Watt. Die Leistung wird in Watt und die Zeit in Sekunden angegeben.	89
Abbildung 57 Vergleich der Stackleistung P_{FPFC} (rot) des Modells mit jener Leistung P_{Stack} (blau) von der Messung. Die Leistung wird in Watt und die Zeit in Sekunden angegeben.	90
Abbildung 58 Vergleich der Leistung P_{Batt} der Batterie des Modells (rot) mit der gemessenen Batterieleistung $P_{Batterie}$ (blau). Die Leistung wird in Watt und die Zeit in Sekunden angegeben.	91

Abbildung 59 Überblick über den gesamten Messaufbau am FC 1200 System von IdaTech.	96
Abbildung 60 Blick von vorne und oben auf das FC 1200 System.	97
Abbildung 61 Rückenansicht, links Fuel Prozessor mit Ansaugung der Umgebungsluft, rechts oben Abluftgebläse mit Temperaturmessung.	98
Abbildung 62 Blick von oben auf Stack der mit einem Plexiglas abgedeckt ist zwecks besserer Kühlung. Temperaturmessung der Luft die durch die Kühlöffnungen des Stacks strömt (50-70 °C). Messung von Spannungen am DC/DC-Konverter und der Stackspannung.	99
Abbildung 63 Messung der Ströme vom Stack (rechte Stromzange) als auch vom Wechselrichter (linke Stromzange). Links unten Gebläse für die Kühlung des Stacks.	100
Abbildung 64 Messsystem Dewetron Rack 8, mit 3 Eingangskanälen von 0-50 Volt, mit drei Eingangskanälen von 0-1000 V und mit zwei Thermoelementeingängen. Am Bildschirm der Data Viewer 1.1 (IdaTech Software), in der Mitte sieht man das Messprogramm.	101
Abbildung 65 Als Last dienten neben der Lichterkette auch noch zwei Widerstände mit je $132\ \Omega$ und einem I_{max} von 3.2 A. Im Hintergrund auf dem Sessel zwei MetraHit 29 S für die Messung der Wirkleistung als auch des Stromes I_5 am Wechselrichter.	102
Abbildung 66 Die Auswertung erfolgte teilweise neben den Messungen. Am linken Notebook wurde in Matlab die Auswertung durchgeführt. Das rechte Notebook diente zum Mitprotokollieren der Messwerte im Programm Excel.	103
Abbildung 67 Bild von oben, man sieht (im Uhrzeigersinn) links unten den Wechselrichter PROsine 1000i, darüber den Tank mit 8 Liter Fassungsvermögen (Methanolwassergemisch), rechts davon das Ansaugrohr für das Gebläse, daneben der Fuel Prozessor, vorne ist der Stack in seiner Plexiglashülle und vor dem Stack befindet sich noch der DC/DC-Konverter.	104
Abbildung 68 Messung des Batteriestromes I_4 mit einer Stromzange (rechts), darüber das Ansaugrohr für das Gebläse, links Blick auf die Brennstoffpumpe.	105
Abbildung 69 Ansicht aus der Froschperspektive, in der Mitte Platine von Ballard, rechts davon Lüftergehäuse für die Ansaugung der Kühlluft für den Stack, links davon die Wasserstoffzuführung zum Stack.	106
Abbildung 70 Methanolwassergemisch in einem 200 Liter Tank, als Druckmittel wird Stickstoff eingesetzt.	107

13. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Brennstoffzellentypen und deren spezifische Eigenschaften (Teil 1, Quelle: [3])...	13
Tabelle 2 Brennstoffzellentypen und deren spezifische Eigenschaften (Teil 2, Quelle: [3])...	14
Tabelle 3 Auswahl möglicher Brennstoffe und deren wichtigen Eigenschaften (Quelle: [3]).	19
Tabelle 4 Technische Angaben von Ballard zum Nexa Power Modul (Quelle: [17]).	32
Tabelle 5 Spezifikationen und Beschreibungen in dieser Abbildung stimmen mit dem Datum der Publikation überein (03/02) (Quelle: [18]).	33
Tabelle 6 Ein Vergleich der wichtigsten Reformtechnologien im Vergleich mit dem Fuel Prozessor von IdaTech (Quelle: [19]).	34
Tabelle 7 Analyse des Produktes Wasserstoff vom Fuel Prozessor von IdaTech, der mit Methanol und Methan betrieben wird (Quelle: [19]).	36
Tabelle 8 Wirkungsgrade des Fuel Prozessors von IdaTech bei Verwendung von unterschiedlichen Ausgangsbrennstoffen (Quelle: [19]).	38
Tabelle 9 Übersicht über die aufgenommenen Messgrößen.	45
Tabelle 10 Wirkungsgrad des Systems bei alternierendem Lastsprung zwischen 300 und 500 Watt Ausgangsleistung am Wechselrichter PROsine 1000i.	57
Tabelle 11 Wirkungsgrad des Systems bei alternierendem Lastsprung zwischen 500 und 700 Watt Ausgangsleistung am Wechselrichter PROsine 1000i.	58
Tabelle 12 Wirkungsgrad des Systems bei alternierendem Lastsprung zwischen 200 und 400 Watt Ausgangsleistung am Wechselrichter PROsine 1000i.	58
Tabelle 13 Alle gemessenen Wirkungsgrade von 100 bis 800 Watt mit Berücksichtigung der dynamischen Verhältnisse.	59
Tabelle 14 Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Werte anhand der Verbrauchswerte des Methanol-Wassergemisches bei stationären Verhältnissen. Die letzte Zeile bezieht sich auf die Normvorgabe des Herstellers, das in einer Stunde bei 850 Watt 1.3 Liter vom Methanol-Wassergemisch verbraucht wird. 1 Liter Brennstoff = 3117.84 Wh.	76
Tabelle 15 Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Werte anhand der Verbrauchswerte des Methanol-Wassergemisches bei dynamischen Verhältnissen.	78
Tabelle 16 Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Werte anhand der Verbrauchswerte des Methanol-Wassergemisches anhand des analysierten Lastsprungs von 500 auf 700 Watt.	91

14. WWW-Verzeichnis

www.IdaTech.com

www.ballard.com

www.hawker.invensys.com

www.statpower.com

www.dewetron.com/at

www.fronius.com

www.fti.tugraz.at/verlag

www.vaillant.de

www.plugpower.com

www.hyweb.de

www.boku.ac.at/h9027481/dateien/photovol.html

www.elsevier.com/locate/elecom

www.ott.doe.gov/oaat

www.mathworks.com

www.a-eberle.de

www.umweltlexikon-online.de

www.oldham.fr

15. Anhang

15.1 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik

[33], [34]

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik trifft zwei Aussagen, erstens über die Existenz einer Zustandsgröße Energie und den allgemeinen Energieerhaltungssatz.

1. Jedes System besitzt eine extensive Zustandsgröße Energie E .
2. Die Energie eines Systems kann sich nur durch Energietransport über die Systemgrenze ändern: Für Energien gilt ein Erhaltungssatz.
3. Kinetische und potentielle Energien der Mechanik sind besondere Formen der Energie. Das Verrichten von mechanischer Arbeit ist eine mögliche Form des Energietransports über die Systemgrenze.

Zur quantitativen Beschreibung des 2. Hauptsatzes wird die Entropie eingeführt.

1. Jedes System besitzt eine extensive Zustandsgröße Entropie S .
2. Die Entropie eines Systems ändert sich
 - a) Durch Wärmetransport über die Systemgrenze (Entropietransport mit Wärme),
 - b) Durch Stofftransport über die Systemgrenze,
 - c) Durch irreversible Prozesse im Inneren des Systems (Entropieerzeugung).
3. Die mit der Wärme dQ über die Systemgrenze transportierte Entropie ist

$$dS_Q = \frac{dQ}{T}, \quad (104)$$

wobei T die thermodynamische Temperatur an der Stelle der Systemgrenze ist, an der dQ übergeht. Die thermodynamische Temperatur ist eine universelle, nicht negative Temperatur.

4. Die durch irreversible Prozesse im Inneren des Systems erzeugte Entropie ist niemals negativ; sie verschwindet nur für reversible Prozesse des Systems.

H. Helmholtz (1874) schrieb jedem Stoffsystem einen bestimmten Energieinhalt U zu. Dabei kann die Energie U verschiedener Natur sein. Die potentielle und kinetische Energie, die mit der Lage und der Bewegung des Systems als Ganzes im Raum zusammenhängen, werden jedoch nicht dazugerechnet. Die so abgegrenzte Energie U wird Innere Energie U genannt; sie ist lediglich eine Funktion des Zustands des Systems und wird durch die Zustandsvariablen festgelegt. Das sind vor allem die Parameter p , und T , es können aber auch weitere sein, wenn auf das System noch andere Kräfte wirken, wie z.B. eine elektrische oder magnetische Kraft. Die Größen, die ähnlich wie die Innere Energie nur vom Zustand des Systems abhängen, nennt man Zustandsfunktionen oder thermodynamische Potentiale. Wenn sich der Zustand eines Systems ändert, so ändern sich auch die Werte der Zustandsfunktionen, unabhängig davon, auf welche Weise bzw. auf welchem Weg das System vom Anfangs- in den Endzustand gelangte. Diese Änderungen der Zustandsfunktionen können wir messen. Der Absolutwert der Zustandsfunktionen aber, somit auch der Wert der Inneren Energie, kann weder gemessen noch berechnet werden, da man nicht genau die Energiemengen der Moleküle, Atomkerne, Elektronen usw. bestimmen kann.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt nichts anderes, als das sich die Energie eines Systems nur dann ändern kann, wenn es in Form von Wärme oder Arbeit oder beider Arten die äquivalente Energiemenge aus seiner Umgebung aufnimmt.

15.2 Verwendete Geräte

Personal Computer

- Tower mit Monitor, Tastatur etc., Selbstbau,
- Notebook Toshiba Tecra,
- Notebook Toshiba Satellite,
- Software: MSOffice, Matlab 6.1, LabView, Corel Draw, ACDSee 32.

Messgeräte

- Fluke 73 III Multimeter.
- 2 MetraHit 29 S, Gossen Metrawatt Camille Bauer.
- Stromadapter, Gossen Metrawatt Camille Bauer.
- 3 Stromzangen, Chauvin Arnoux E6N, Current Probe, 70 AAC, 100 ADC.
- Stromzange Fluke 80i 110S AC/DC Current Probe.
- Leitfähigkeitsmeßgerät, TDSTestr 40, Oakton.
- Gasdetektor TIF Combustible Gas Detector TIF 8800 INTL (220V).
- Oszilloskop HP 54645A 100MHz 200 MSa/s.
- Dewetron Signal Conditioning Rack 8 Channels.
- Messtrennverstärker (Eigenbau, TU-Graz).
- Akku Ladegerät Varta Multi Comfort Charger.
- AD-Karte National Instruments mit dazugehörigem Verbindungskabel.
- OSMU-Oberschwingungsmessumformer, (Eigenbau TU-Graz, Hr. Dr. Renner).
- Emissionsmessgerät Advance Optima von der Fa. Hartmann & Braun mit den Einzelkomponenten Uras 14 und Caldos 17.
- Toximeter TX 11, CO Messgerät, Firma Oldham France S.A .

Andere Geräte

- Dichtespindel Geco, Bereich 0.8-0.9.
- 2 Widerstände $132\ \Omega/3.2\ \text{A}$, Reo Solingen.
- Induktivitätsmodul (0.4 H/1.2 A, 0.8H/0.6A, 1.6H/0.4A) (Eigenbau, TU-Graz).
- 2 Kapazitäten mit je $5\ \mu\text{F}/250\ \text{V}$ Siemens Austria.
- Zeitschaltuhr,
- Lichterkette,
- 3 NiMH Akkumulatoren Block 9 V.
- Diverse Batterien, Glühlampen und Strippen für den Messaufbau bzw. Inbetriebhaltung.

15.3 Daten

Alle Messprotokolle, Messwerte, Auswertungsprogramme, Modell etc. sind auf einer CD-ROM angeführt.